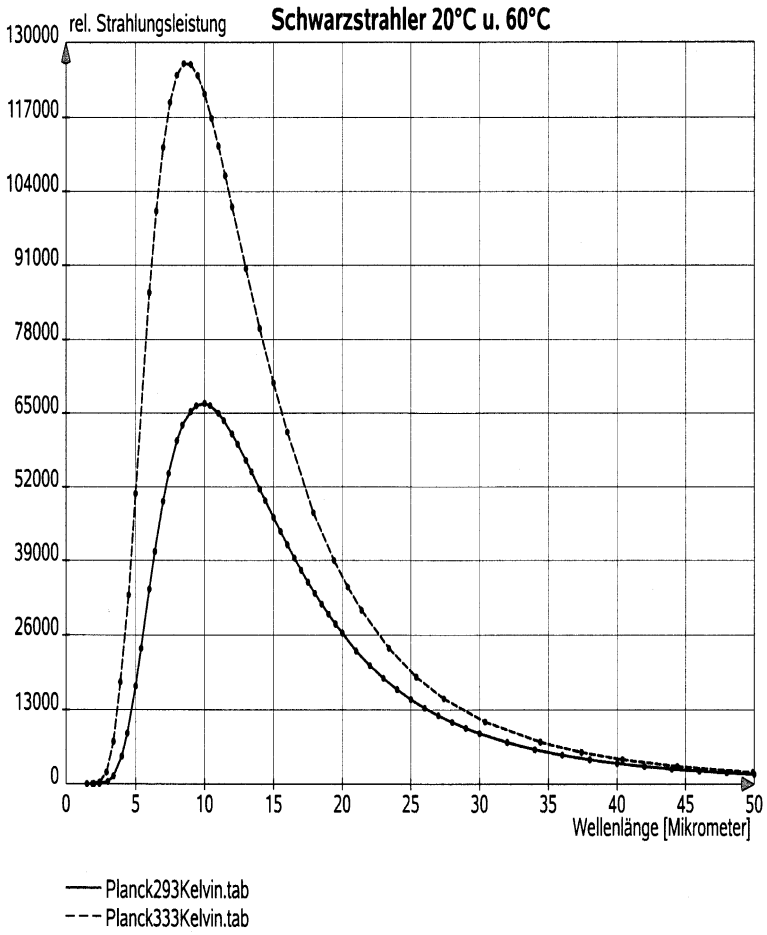
Der Treibhauseffekt

Messungen an einem Wood'schen Treibhaus

von

Ehrenfried Loock

Version 1.5 17.08.2008



Der Treibhauseffekt

Der Anstoß zu dieser Untersuchung:

In einer umfangreichen, ins Internet gestellten Arbeit mit dem Titel ***„Falsification Of The Atmospheric CO_2 Greenhouse Effects Within The Frame Of Physics“*** Version 3.0 (September 9, 2007) wird von Gerlich und Tscheuschner[1] eine experimentelle Arbeit aus dem Jahre 1909 von R.W. Wood[2] zitiert, in der der Einfluß der „eingefangenen“ Wärmestrahlung auf den Treibhauseffekt untersucht wurde. Dazu diente der hier aus dem Text nachempfundene Versuchsaufbau:

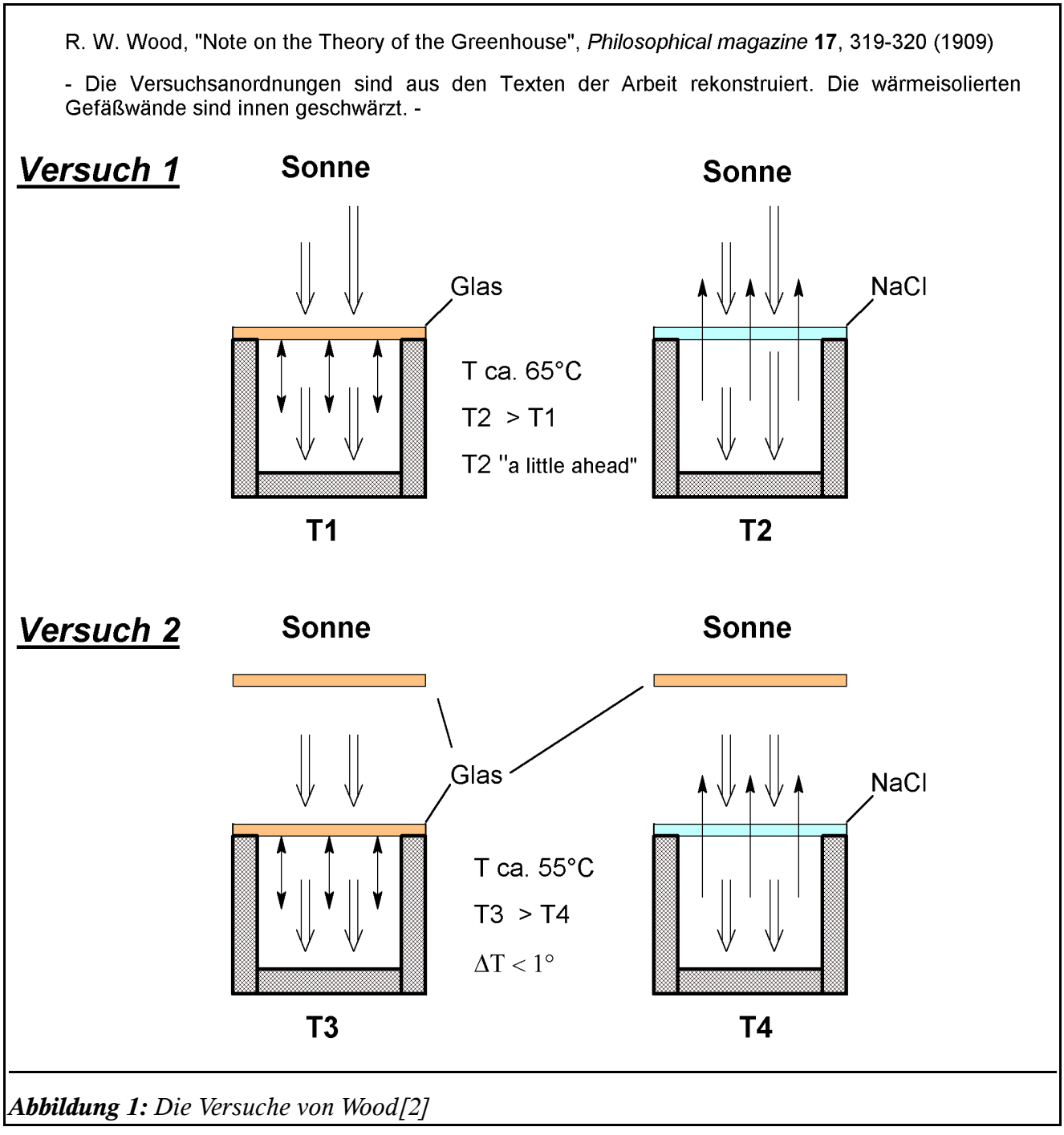


Abbildung 1: *Die Versuche von Wood[2]*

Normales Glas ist ebenso wie Kochsalz für sichtbares Licht gut durchlässig, blockiert jedoch den Infrarot-Anteil der Strahlung. Dies tut Kochsalz(**NaCl**) nicht! Wenn der Treibhauseffekt vor allem auf dem Einfangen der an den inneren, schwarzen Wänden gebildeten IR-Strahlung beruhte, müßte das Gefäß mit Kochsalz-Deckel sich in der Sonne wesentlich weniger erwärmen, da die IR-Strahlung durch das für

sie offene Kochsalzfenster ungehindert austreten kann. **Versuch 1** erbrachte genau das Gegenteil, nämlich ein etwas wärmeres Kochsalz-Gefäß. Da das Sonnenlicht jedoch einen großen IR-Anteil enthält, brachte Wood zwischen Sonne und „Treibhaus“ Glasplatten an, die nur kurzwelliges Licht in die Kammern lassen sollten. Bei diesem **Versuch 2** war jetzt die Glasfenster-Kammer zwar wärmer, aber um so wenig, daß *Wood* der 'eingefangenen' IR-Strahlung keinen wesentlichen Einfluß zugestand.

Man sollte diesen Effekt vielleicht ***Schilda-Effekt*** nennen, nach den Bürgern von Schilda, die das Sonnenlicht in Säcken in ihr versehentlich ohne Fenster gebautes Rathaus bringen wollten. Die Versuche von Wood sollten sich mit relativ einfachen Mitteln zwecks Verfeinerung und eventuell Erweiterung nachvollziehen lassen. Da immer noch die meisten Erklärungen zum Begriff *Treibhauseffekt* mit den Worten beginnen „Das ist genau wie beim Glashaus(Treibhaus, Gewächshaus).....“, lohnt es sich, hier für etwas mehr experimentelle Klarheit zu sorgen. Wikipedia bringt unter dem Stichwort „***Glashauseffekt“*** eine völlig mit Wood übereinstimmende, prägnante Definition, der nichts hinzuzufügen ist. Auf derselben Seite unter ***„Kompakte Darstellung des Mechanismus“*** (zum Treibhauseffekt) wird dann alles in einen Topf geworfen, etwas umgerührt und der Quark ist fertig(s.u.).

Glashauseffekt ('Wikipedia' vom 15.01.2008)
Als Glashauseffekt (abgeleitet aus dem Französischen von *effet de serre*, wie er zuerst von Joseph Fourier genannt wurde) wird der Treibhauseffekt dann bezeichnet, wenn in einem Innenraum durch verglaste Fensteröffnungen oder Dächer Sonnenlicht einfällt und von den Materialien des Innenraums absorbiert wird. Dadurch kann sich der Innenraum deutlich über das Niveau der Umgebungstemperatur aufheizen. Von den aufgeheizten Wandflächen erwärmt sich über Wärmeleitung und Konvektion die Luft im Innenraum. Da bei einem geschlossenen Glashaus nur wenig erwärmte Luft durch kalte Außenluft ersetzt wird, ist der Kühlungseffekt durch kalte Außenluft nicht groß. Zuweilen wird der Glashauseffekt nach den großen, architektonisch stilvollen Gewächshäusern von Botanischen Gärten und Schlossparks – den Orangerieen – auch **Orangerieeffekt** genannt.

Kompakte Darstellung des Mechanismus ('Wikipedia' vom 15.01.2008)
Der Treibhauseffekt beruht auf wenigen Schritten:

1. Die Sonne strahlt sehr viel Energie in Form von elektromagnetischen Wellen zur Erde. Dadurch wird die Oberfläche der Sonne gekühlt (Strahlungskühlung).
2. Die häufigsten Photonenwellenlängen des Sonnenlichtes liegen um 500 nm, das entspricht grünem Licht. Aus diesem Strahlungsmaximum kann man auf die Oberflächentemperatur der Sonne rückschließen: etwa 5600 °C oder 5900 K.
3. In diesem Spektralbereich (sichtbares Licht) absorbieren die Lufthülle der Erde und Glasscheiben nur wenig - man spricht von hoher Transparenz. Die Strahlung kann also fast ungehindert *in* das Treibhaus.
4. Die Gegenstände im Treibhaus absorbieren die Photonen und erwärmen sich dadurch auf etwa 30 °C oder 300 K.
5. Die erwärmten Gegenstände strahlen ebenfalls elektromagnetische Wellen ab, deren häufigste Wellenlängen aber bei 10000 nm liegen (Infrarotstrahlung). Der Grund für diese Verlängerung der Wellenlänge heißt Wiensches Verschiebungsgesetz: Wenn die (absolute) Temperatur auf 1/20 sinkt, steigt die Wellenlänge, bei der die größte Strahlungsintensität auftritt, auf das 20-fache.
6. ***Für diese "Rückstrahlung" ist aber Glas und zunehmend auch die Lufthülle der Erde undurchlässig. Die Folge: Die Gegenstände im Treibhaus werden wegen dieser fehlenden Strahlungskühlung stärker aufgeheizt als man auf Grund des Strahlungsgleichgewichtes erwarten würde.***
7. Im Grenzfall bei absoluter Undurchlässigkeit im IR-Bereich muss die Temperatur im Treibhaus oder auf der Erde auf fast 5900 K steigen - nur dann können die Gegenstände (oder die gesamte Erde) im verbliebenen Wellenlängen-"Fenster" um 500 nm genauso viel Energie ins All abstrahlen wie sie von der Sonne empfangen.

Während der 'Glashauseffekt' in 'Wikipedia' eindeutig beschrieben ist, wird im selben Artikel in der 'Kompakten Darstellung des Mechanismus' der Treibhauseffekt und der Glashauseffekt in einen Topf

geworfen und unzulässig verknüpft. Ein wichtiger Punkt, der die Sonnenstrahlung betrifft, wird nicht genannt: **Die Sonne strahlt einen großen Teil ihrer Energie im Infrarotbereich ab. Die abgestrahlte Energie des gesamten Infrarot ist sogar etwas größer als die des sichtbaren Lichtes!**

zu Punkt 4: Die Zahlenangabe ist unsinnig. Bei **30°C** verbrennt man sich nicht die Finger, wohl aber an einem Autolenkrad, das bei geschlossenen Scheiben einige Zeit der Sonne ausgesetzt war.
zu Punkt 5: Das Wiensche Verschiebungsgesetz ist natürlich nicht der Grund für diesen Zusammenhang sondern beschreibt lediglich eine Eigenschaft der festen Materie.
zu Punkt 6: Was im Treibhaus als Temperatur gemessen wird, ist primär die Lufttemperatur. Durch die verhinderte 'Rückstrahlung' wird zunächst nur das Glas wärmer und erwärmt die angrenzende Luft, wie alle anderen Materialien im Treibhaus es auch tun. Daß die Lufthülle der Erde *zunehmend undurchlässig* für Wärmestrahlung wird, ist sprachlicher Unsinn, denn *undurchlässig* ist nicht steigerbar. Die Transparenz der Atmosphäre ändert sich mit jeder Wolke und ist global genauso aussagekräftig wie die Durchschnittstemperatur der Erde oder die durchschnittliche Telefon-Nummer von Berlin.
zu Punkt 7: Diese Fiktion eines luftleeren Treibhauses funktioniert selbst im Weltall nicht, da die Treibhausfenster eben keine Reflektoren sind, die ohne Selbsterwärmung alle Energie zurückstrahlen. Selbst im luftleeren Weltall würde die allen Materialien eigene Wärmeleitfähigkeit für den Wärmetransport nach außen und entsprechende Wärmeabstrahlung an den äußeren Grenzflächen sorgen.

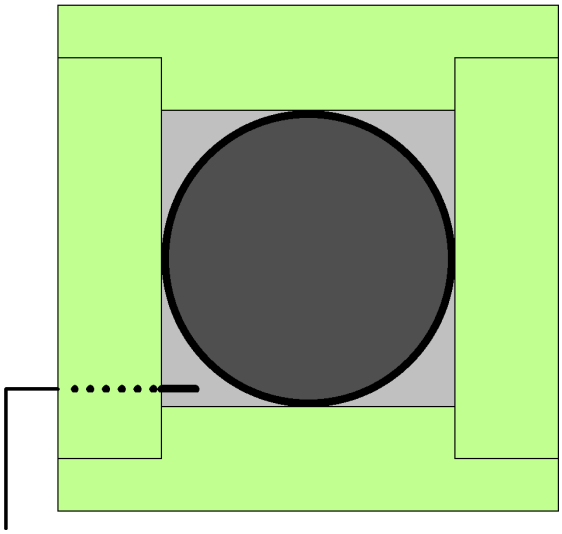
Die 'Kompakte Darstellung des Mechanismus' versucht, zwei unterschiedliche Phänomene durch eine allgemeine Beschreibung auszudrücken, die dann für beide falsch oder unzureichend ist.

Das Labortreibhaus in der Küche

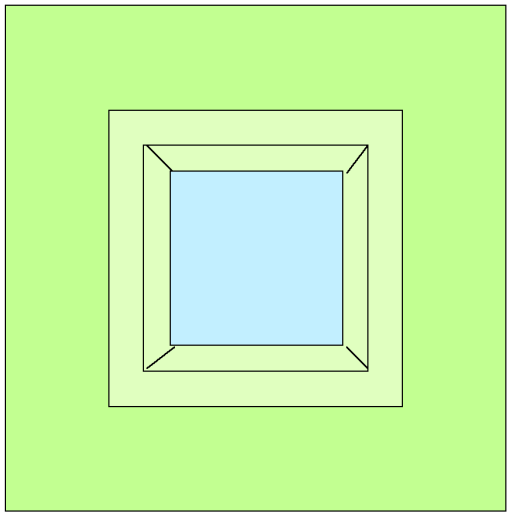
Abbildung 2: *Labortreibhaus - Messplatz mit Halogenstrahler, Stromversorgung, Ventilator, CO_2-Quelle, Argon-Druckgasflasche und Thermometern*

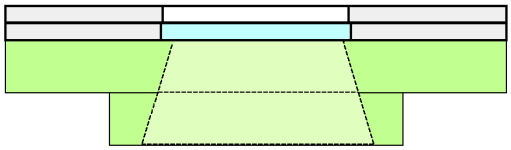
Labortreibhaus mit variablen Fenstern und Innenteilen

Material: Styrodur^{R} (trittfester Polystyrol-Schaum)



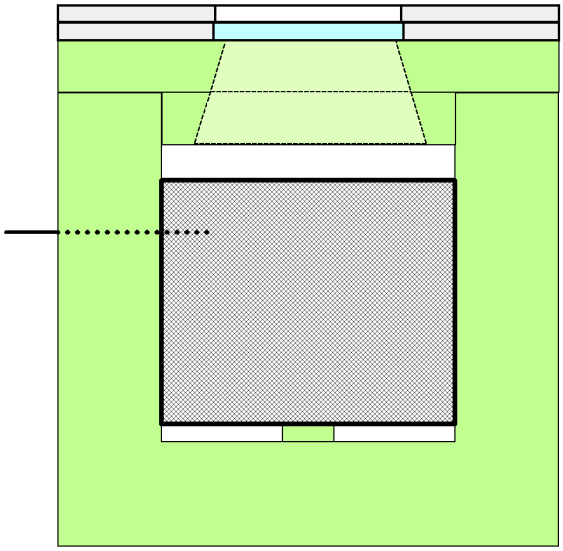
Offene Kammer mit Thermoelement und mattschwarzer Weissblechdose (Aufsicht)



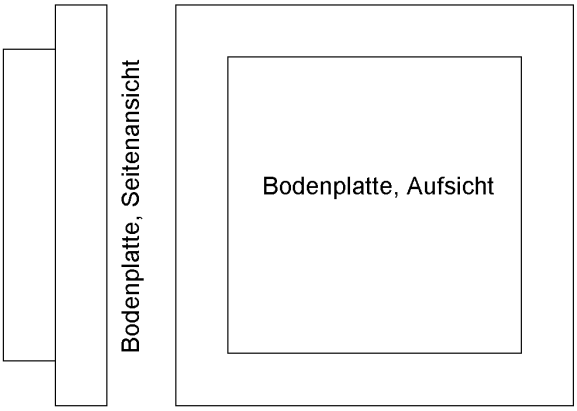


Verschlussdeckel mit Fensterhalterung und Fenster (Aufsicht und Querschnitt)

145 mm



Labortreibhaus, Querschnitt
(Thermoelement ausserhalb der Dose)



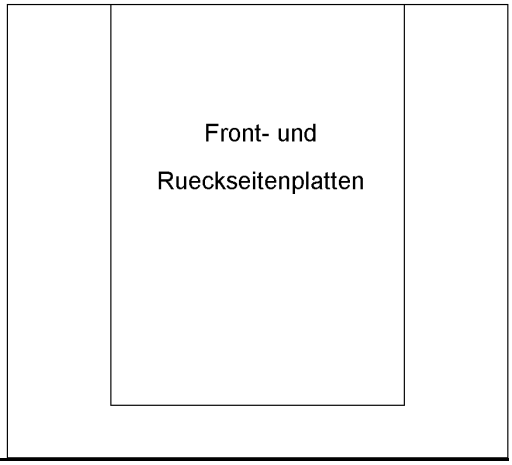


Abbildung 3: *Labortreibhaus - Technische Details*

Versuchsanordnung:

Als Experimentierraum, der die Messungen mit beeinflußt, wird von mir eine ehemalige Küche mit brauner Holzdecke und alter Kücheneinrichtung benutzt. Der Raum ist gleichzeitig Computer-Arbeitsraum- und Bastelbude. Er wird wie ein normaler Wohnraum beheizt. Die Position des Labortreibhauses ist durch eine Stativstange im Raum fixiert und wurde bei allen Messungen beibehalten.

Material und Investitionen:

- Fensterglas aus Hausbestand
- 2 Kochsalzfenster in optischer Qualität von Fa. Korth Kristalle/Altenholz(Kiel)[3]
- 220 V Halogenlampe vom Baumarkt
- Isolierschaumstoff-Platten aus Polystyrol-Werkstoffen vom Baumarkt
- Sprudelwasser-Automat zur CO_2-Versorgung aus Hausbestand
- Argon-Druckgasanlage aus Industriebedarf-Handel
- 30 V Gleichspannugs-Netzteil Fa. Reichelt/Sande
- Multimeter + Thermoelement Fa. Reichelt/Sande
- div. Thermometer aus Hausbestand
- Ventilator aus Hausbestand, Eigenbau mit Kopierer-Lüfter
- Laborstativ + Zubehör, Chemikerthermometer Fa. Omikron/Internet

Versuchsdurchführung:

In Anlehnung an Versuche von *R.W. Wood* [2] aus dem Jahre 1909 wurde ein wärmeisolierter Behälter(s.o.) mit Innenthermometer und einem Strahlungsfenster aus **Glas**, Kochsalz(**NaCl**) oder anderen optisch durchsichtigen Materialien mit einer Wolfram-Halogenlampe von **47 Watt** Nennleistung bestrahlt, die die Sonne simulieren sollte. Es wurden die Temperatur-Maxima im Inneren des Behälters gemessen. Da die Halogenlampe ebenso wie die Sonne einen erheblichen Anteil ihrer Strahlung im Infraroten aussendet und dadurch je nach Fenster unterschiedliche Energiemengen eingestrahlt und an den schwarzen Innenflächen in Wärme umgewandelt werden, ist bereits von *Wood* für beide Fenstertypen eine zusätzliche Glasplatte zur IR-Absorption zwischen Lampe und Einstrahlungsfenster angebracht worden. Das wurde auch hier praktiziert. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen kamen Vergleichsmessungen mit anderen Fenstermaterialien hinzu. Dann wurde die Strahlungsquelle durch eine innere Widerstandsheizung ersetzt, um Einstrahlungs- und Ausstrahlungs-Effekte zu trennen. Schließlich wurden Reihenmessungen mit Widerstandsheizung und **CO_2** und **Argon** als Füllgase durchgeführt.

Physikalisch-technische Grundlagen

Konstruktion:

Das Labortreibhaus ist aus 3 cm dickem Polystyrolschaum(Styrodur^R BASF) gefertigt und so mit Montagekleber verbunden, daß keine direkten Wärmebrücken zwischen Innen und Außen über die Klebungen vorhanden sind. Die Fensterhalterungen bestehen aus **6 mm** dickem, weißem Polystyrolschaum. Sie liegen lose oben auf und werden ebenso wie der Deckel zur Messung seitlich mit Klebeband umschlossen. Die Fensterscheiben liegen auf der Umrandungsfläche der Fensteröffnung. Sie werden nur seitlich gehalten und erlauben den nötigen Druckausgleich beim Erwärmen. Als Absorber und Emitter elektromagnetischer Strahlung enthält das Isoliergefäß eine runde, innen mattschwarz lackierte Weißblechdose(Kunstschmiede-Mattlack 9900) mit einer offenen Seite in Richtung Fenster. Die Dose wiegt **36 g**, mit Lack **40 g**. Die Metalldose dient gleichzeitig als Wärmeverteiler für den Innenraum, damit Temperaturspitzen durch die gerichtete Einstrahlung abgebaut werden. Bis auf die kleinen Bereiche mit direktem Wand- oder Bodenkontakt kann die Luft zwischen den Doseninnen- und -außenseiten frei zirkulieren. Das Thermometer befindet sich außerhalb des Einstrahlkegels der Lampe im Winkel zwischen runder Dose und quadratischem Innenraum.

Strahlung und Wärme:

Das Licht der Halogenlampe (evtl. vorgefiltert) fällt durch das Einstrahlungsfenster auf die mattschwarz lackierten Innenseiten der Absorptionsdose und wird dort praktisch vollständig in Wärme

umgewandelt, die sich im Innenraum verteilt und die Temperatur am Thermometer ansteigen läßt.

Aus weiter unten beschriebenen Messungen mit Widerstandsheizung im Treibhaus-Inneren geht hervor, daß etwa **4 W** benötigt werden, um auf ca. **60°C** Endtemperatur zu kommen. Demnach gelangt ca. **8,5%** der Lampen-Nennleistung**(47 W)** durch die Labortreibhaus-Fenster ins Innere und wird dort in Wärme umgewandelt. Mit steigender Innentemperatur findet ein wachsender Wärmefluß in die äußere Umgebung statt, der den Temperaturanstieg durch die Einstrahlung begrenzt. Wenn die Temperatur ihr Maximum erreicht hat, was bei der hier benutzten Apparatur mehrere Stunden dauern kann, sind Wärmezufluß und Wärmeabfluß gleich groß. Beim Labortreibhaus mit konstanter Lichteinstrahlung geht es um die Frage, wodurch und in welcher relativen Größe die entstehende Wärme abgeführt oder zurückgehalten wird.

Jedes Material, das elektromagnetische Strahlung(z.B. Licht) absorbiert, strahlt auch wieder elektromagnetische Wellen aus. Dabei gilt die Regel, daß ein guter Absorber auch ein guter Emitter ist, das heißt, daß die mattschwarz lackierte Absorptionsdose auch sehr gut elektromagnetische Strahlung abgibt. Die Emission ist von der Temperatur abhängig und liegt bei niedrigen Temperaturen weit im Infraroten. Bei ideal schwarzen Körpern gilt für das Wellenlängen-Maximum $\boldsymbol{\lambda_{max}}$ bei der absoluten Temperatur **T** in Kelvin das **Wien'sche Verschiebungsgesetz**:

$$\boldsymbol{\lambda_{max} = 2897{,}8 / T\ [\ \mu m\ ].}$$

Nimmt man für das Labortreibhaus z.B. eine gleichmäßige Innentemperatur von **60°C = 333°K** an, dann emittiert die Absorptionsdose Strahlung mit einem Wellenlängen-Maximum von **2897,8 / 333 = 8,7 µm**.

Die atmosphärischen Gase spielen für die Strahlung in diesem Labortreibhaus keine Rolle, da bei den eingestrahlten Wellenlängen praktisch keine Absorption oder Emission stattfindet und die minimale Absorption der Schwarzkörperstrahlung der Absorptionsdose im IR-Bereich durch Wasserdampf und CO_2 wegen der relativ geringen Konzentrationen und Schichtdicken im Labortreibhaus zu vernachlässigen ist. Wenn also von Wärmestrahlung in einem Raum die Rede ist, so stammt diese nicht aus dem Gasraum sondern von den erhitzten Wänden oder dem Heizkörper selber!

Die Atmosphärengase übernehmen an der schwarzen Strahlungs-Grenzschicht jedoch die erzeugte Wärme in Form kinetischer Energie und transportieren sie per Konvektion und Wärmeleitung zu allen Oberflächen. Thermos-Kannen sind daher evakuiert, um den Wärmetransport durch Gase gering zu halten und verspiegelt, um den Wärmedurchgang für Strahlung zu blockieren.

Strahlungs- und Wärmefenster:

Normales Fensterglas ist für sichtbares Licht gut durchlässig. Ab Wellenlängen von ca. **4,5 µm**(Infrarot) findet wegen der Si-O-Gitterschwingungungen in Silikat-Gläsern praktisch vollständige Absorption statt(Schott, Glaseigenschaften). Demnach würde durch ein Glasfenster nur sehr wenig Wärme direkt per Strahlung das Labortreibhaus verlassen können, da bei der angenommenen Strahlungstemperatur von **60°C** das Wellenlängen-Maximum bei **8,7 µm** liegt.

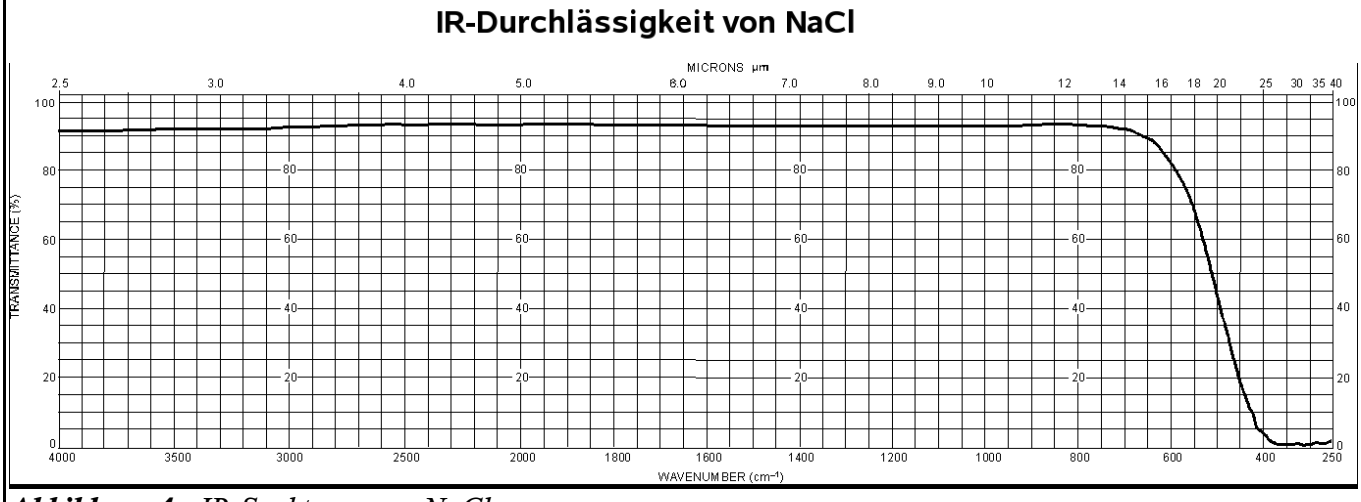


Abbildung 4: *IR-Spektrum von NaCl*

Ein Fenster aus einem reinen Kochsalz-Einkristall**(NaCl)** ist jedoch bis **18 µm** noch gut für IR durchlässig(**Abb.4**; Grafik von Korth Kristalle GmbH[3]) und läßt die **60°**-Strahlung der Absorptionsdose

weitgehend passieren. Bei gleicher Einstrahlungsleistung sollte das Labortreibhaus mit **NaCl**-Fenster deshalb durch Strahlungskühlung innen merkbar kühler bleiben. *Woods* Versuche in 1909 mit diesen beiden Fenstermaterialien ergaben jedoch keinen wesentlichen Einfluß der Strahlungskühlung auf die Maximaltemperatur in den isolierten Kammern.
Dazu muß man die Vorgänge an den Fenstern genauer betrachten:

1. Das Glasfenster absorbiert die auftreffende innere Infrarot-Strahlung wie alle anderen Innenwände auch und erwärmt sich dabei. Über die Wärmeleitung im Glas und den Wärmeaustausch mit der äußeren Umgebung findet ein Wärmetransport nach außen statt.
2. Sowohl das Glas- wie auch das NaCl-Fenster werden von innen durch die an der bestrahlten Absorptionsdose erzeugte Warmluft aufgeheizt und transportieren Wärme per Wärmeleitung und Austausch mit der Umgebung nach außen. Die Wärmeleitfähigkeit von NaCl ist etwa 8-mal so groß wie die von Fensterglas, die der Luft ist dagegen 240-mal geringer als die von NaCl und 32-mal geringer als die von Fensterglas.
3. Wie jeder Festkörper strahlen die Fenster entsprechend ihrer Temperatur mit einem Wellenlängen-Maximum, das sich mit dem Wien'schen Verschiebungsgesetz(s.o.) berechnen läßt. Das Wellenlängen-Maximum ist unabhängig vom Material, nicht aber die Strahlungsintensität. Hier gilt die Kirchhoff'sche Regel: *Ein guter Absorber ist auch ein guter Emitter und umgekehrt.*

Labortreibhaus und Wolfram-Halogenlampe als schwarze Strahler:

Man kann für das Treibhaus mit einer Ausstrahlungsfläche von **2,4 · 10^{-3} m²** und vorgegebenen Innentemperaturen die Strahlungsleistungen in Abhängigkeit von der Wellenlänge berechnen. Dazu benötigt man das **Plancksche Strahlungsgesetz** für schwarze Körper.

Plancksches Strahlungsgesetz nach Wikipedia

$$M^{o}_{\lambda}(\lambda, T)\,\mathrm{d}A\,\mathrm{d}\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right)} - 1}\mathrm{d}A\,\mathrm{d}\lambda$$

SI-Einheit von $M^{o}_{\lambda}(\lambda, T)$: W m^{-2} µm^{-1}.

$M^{o}_{\lambda}(\lambda, T)\,\mathrm{d}A\,\mathrm{d}\lambda$ ist die Strahlungsleistung, die vom Flächenelement dA im Frequenzbereich zwischen λ und $\lambda + \mathrm{d}\lambda$ in den gesamten Halbraum abgestrahlt wird. Weiter sind h das plancksche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit und k die Boltzmannkonstante.

Abbildung 5: *Plancksches Strahlungsgesetz in der Wellenlängen-Darstellung*

Die folgenden Grafiken zeigen die Kurven für **20°C**, **60°C** und die der **Wolfram-Halogenlampe** zum Vergleich. Die Glühwendeln von Wolfram-Halogenlampen haben nach Wikipedia eine Temperatur von **2300 - 2700°C = 2573 - 2973°K**. Die zur Berechnung benötigte Ausstrahlungsfläche kann auf zwei Wegen näherungsweise bestimmt werden. Soweit erkennbar enthält die verwendete 220V-Halogenbirne eine runde, tetraedrisch aufgehängte Sekundärwendel von ca. 15 mm Gesamtlänge und ca. 0,5 mm Durchmesser, entsprechend einer Fläche $\mathbf{F_{Wendel} = 2\pi \cdot r \cdot l = 23{,}6\ mm^2}$. Andererseits kann die Ausstrahlungsfläche nach Stefan-Boltzmann (s.u.) aus der Heizwendel-Temperatur (**2573 - 2973°K**) und der Lampenleistung (**47 W**) errechnet werden. Man erhält: $\mathbf{F_{2573K} = 18{,}9\ mm^2}$ und $\mathbf{F_{2973K} = 10{,}6\ mm^2}$. Die auf unterschiedlichen Wegen ermittelten Flächenwerte stimmen recht gut überein. Zur Berechnung der Halogenlampen-Vergleichskurve wird die Glühwendeltemperatur **T = 2573°K** und die zugehörige Fläche $\mathbf{F_{2573K} = 18{,}9\ mm^2}$ verwendet. Die Kurvenflächen stellen die Gesamt-Strahlungsleistung dar. Es läßt sich erkennen, daß das Fenstermaterial (**NaCl**) die IR-Strahlung nur unwesentlich behindert.

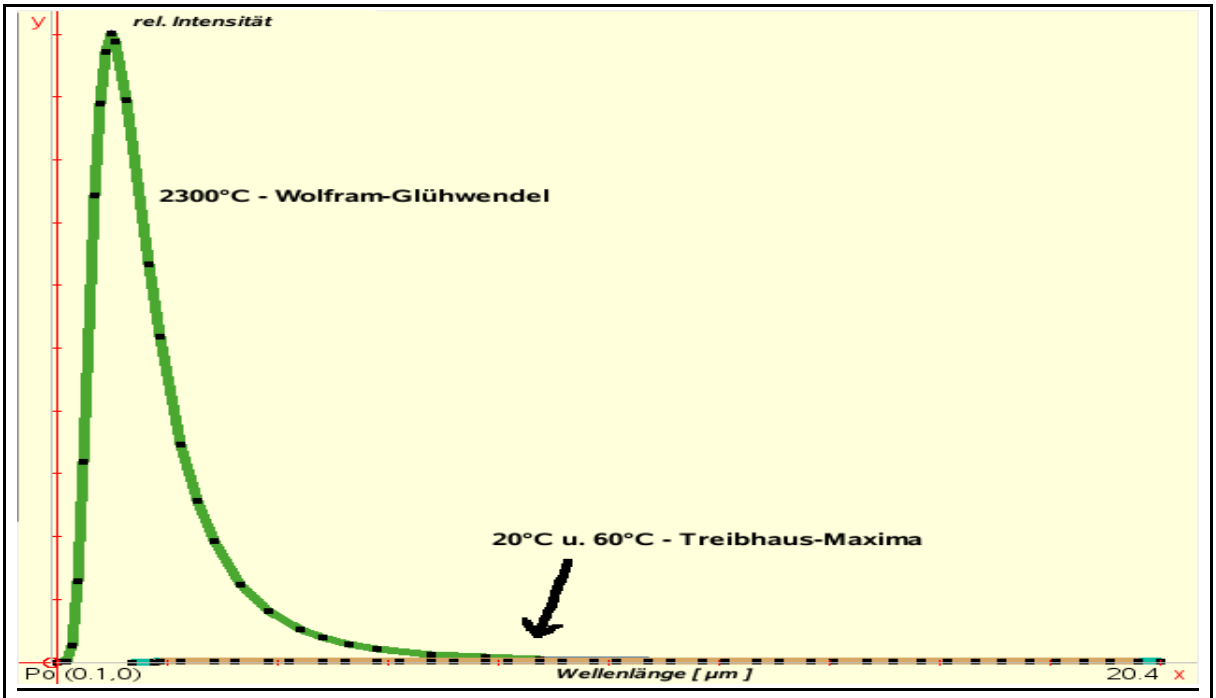


Abbildung 6: *Planck'sches Strahlungsgesetz – Strahlungsleistung mit linearer Skalierung; Strahlungsfläche Glühwendel = 18,9 mm²; Strahlungsfläche Treibhaus = 2401 mm².*

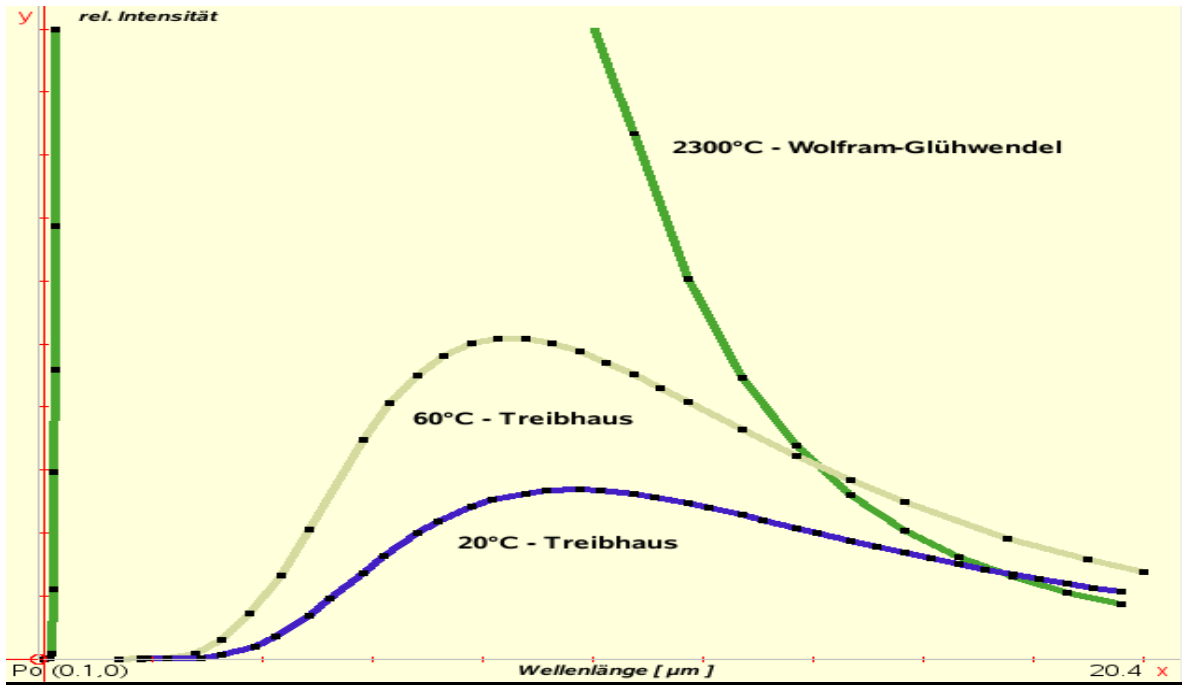


Abbildung 7: *wie Abb. 6, aber mit stark gedehnter y-Achse*

Die **60°C**-Kurve wurde gewählt, weil die Versuchsbedingungen so eingerichtet werden müssen, daß dieser Wert nicht wesentlich überschritten wird, um das Isoliermaterial nicht zu beschädigen. Die Grafiken machen deutlich, wie gering der theoretisch mögliche Anteil der *Strahlungskühlung* des Labortreibhauses gegenüber der Ausstrahlung der Halogenlampe ist. Die gesamte Strahlungsleistung eines ideal schwarzen Strahlers bei **60°C** mit der Fläche des Labortreibhaus-Fensters beträgt **1,67 W** (Berechnung nach Stefan-Boltzmann; s.u.). Man erkennt an den Vergleichkurven, daß sowohl die Halogenlampe als auch die Sonne bis weit in den Infrarotbereich Strahlung abgeben. Beide emittieren mehr Energie im Infrarot als im sichtbaren Bereich, besonders die Wolfram-Halogenlampe.

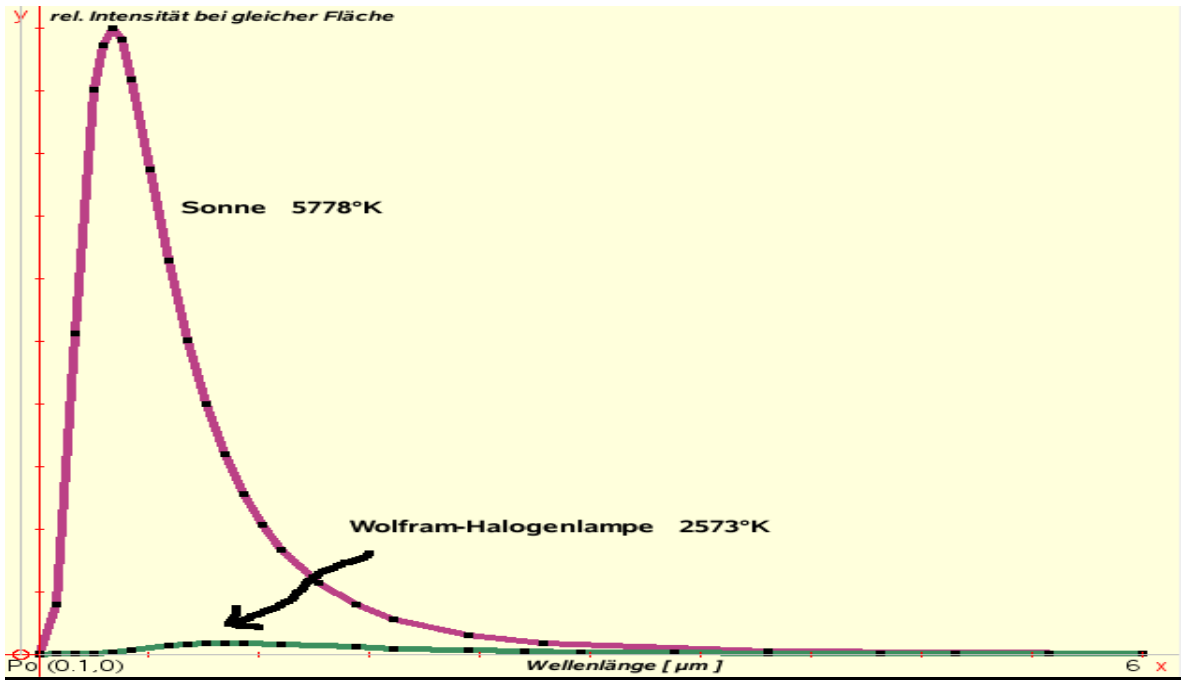


Abbildung 8: *Planck'sches Strahlungsgesetz - Vergleich der Strahlungleistung gleicher Flächen bei Sonnentemperatur und Halogenlampen-Temperatur*

Wärmeleitfähigkeit λ_{th} :			
	Luft	0,024	W/(m·K)
	Argon	0,016	"
	CO_2	0,015	"
	Styrodur^R	0,032	"
	Glas	0,76-1	"
	NaCl	6,49	"
	Aluminium	221	"

Die Wärmeleitwerte $\mathbf{G_{th}}$ der Treibhausteile(Quader) kann man nach der Gleichung $\mathbf{G_{th} = \lambda_{th} \cdot F / d}$ berechnen(F = Fläche in Metern; d = Schichtdicke in Metern).

Wärmeleitwerte der Treibhausteile $\mathbf{G_{th}}$:

Styrodur^R-Wände, gesamt	$F = 3{,}77 \cdot 10^{-2}$ m^2	$d = 3 \cdot 10^{-2}$ m	$\mathbf{G_{th}}$ = 0,04 W/ K
Glas-Fenster(49x49x5,2mm)	$F = 2{,}40 \cdot 10^{-3}$ m^2	$d = 5{,}2 \cdot 10^{-3}$ m	$\mathbf{G_{th}}$ = 0,35 W/ K
NaCl-Fenster(49x49x6mm)	$F = 2{,}40 \cdot 10^{-3}$ m^2	$d = 6 \cdot 10^{-3}$ m	$\mathbf{G_{th}}$ = 2,60 W/ K

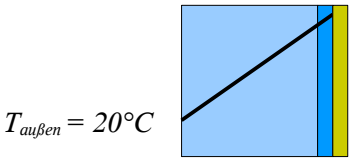
Bei einer Innentemperatur von **60°C** und einer Außentemperatur von **20°C (ΔT = 40K)** könnten also die folgenden Wärmemengen pro Sekunde durch die Wand- und Fenster-Materialien transportiert werden, wenn ein genügender Wärmetransport zu und über die Grenzflächen möglich wäre:

Wärmetransportleistung $\mathbf{G_{th} \cdot \Delta T}$:		
	Styrodur^R-Wände, gesamt	0,04 · 40 = 1,6 W
	Glas-Fenster(49x49x5,2mm)	0,35 · 40 = 14 W
	NaCl-Fenster(49x49x6mm)	2,60 · 40 = 104 W.

Die Wärme wird durch Strahlung und durch die kinetische Energie des Füllgases auf die Wandflächen übertragen. Die Wärmeleitwerte einer z.B. **1 mm** dicken, ruhenden Gas-Schicht, die den betreffenden Flächen aufliegt, geben Aufschluß über die tatsächlich möglichen Wärmetransportleistungen durch reine Wärmeleitung. Zur Abschätzung der Wärmetransportleistungen wird im Gleichgewichtsfall ein gleichmäßiger Temperaturgradient zwischen Innen und Außen von **ΔT = 40°C** angenommen und die daraus errechnete Temperaturdifferenz des Materials in **1 mm** Tiefe von Innen berechnet. Diese Größe

geht als Temperaturgradient **ΔTg** der Gas-Schicht in die Abschätzung der Wärmetransportleistung ein.

Styrodur^{R}: 40/30 = 1,33°C/mm;
Glas: 40/5,2 = 7,69°C/mm;
NaCl: 40/6 = 6,67°C/mm;



Gas-Schicht innen = gelb;
Temperaturgradient = schräge Linie

Wärmeleitwert und Wärmetransportleistung einer 1 mm dicken Gas-Schicht:
F = Innenflächen der Wände oder Fenster; **d** = Schichtdicke = **1 mm = 10^{-3} m**

$$\mathbf{G_{th} = \lambda_{th} \cdot F / d}$$

Styrodur^{R}-Wände (F = 3,77·10^{-2} m^2 ; d = 1 ·10^{-3} m)		**Wärmetransportleistung** bei **ΔTg** = 1,33°C
Luft:	**G_{th}** = 0,91 W/ K	**G_{th} · ΔTg** = 0,91 · 1,33 = 1,21 W
Argon:	**G_{th}** = 0,60 W/ K	**G_{th} · ΔTg** = 0,60 · 1,33 = 0,80 W
CO_2:	**G_{th}** = 0,57 W/ K	**G_{th} · ΔTg** = 0,57 · 1,33 = 0,76 W
Glas-Fenster (F = 2,40·10^{-3} m^2; d = 1 ·10^{-3} m)		**Wärmetransportleistung** bei **ΔTg** = 7,69°C
Luft:	**G_{th}** = 0,058 W/ K	**G_{th} · ΔTg** = 0,058 · 7,69 = 0,45 W
Argon:	**G_{th}** = 0,038 W/ K	**G_{th} · ΔTg** = 0,038 · 7,69 = 0,29 W
CO_2:	**G_{th}** = 0,036 W/ K	**G_{th} · ΔTg** = 0,036 · 7,69 = 0,28 W
NaCl-Fenster (F = 2,40·10^{-3} m^2; d = 1 ·10^{-3} m)		**Wärmetransportleistung** bei **ΔTg** = 6,67°C
Luft:	**G_{th}** = 0,058 W/ K	**G_{th} · ΔTg** = 0,058 · 6,67 = 0,39 W
Argon:	**G_{th}** = 0,038 W/ K	**G_{th} · ΔTg** = 0,038 · 6,67 = 0,25 W
CO_2:	**G_{th}** = 0,036 W/ K	**G_{th} · ΔTg** = 0,036 · 6,67 = 0,24 W

Die **Wärmetransportleistung** einer 1 mm dicken, ruhenden Gas-Schicht an den Labortreibhaus-Flächen ist nach dieser Abschätzung je nach Gas und Material um den Faktor **1,3** bis **433** kleiner, als per Wärmeleitung durch das Material hindurch möglich wäre. Die kleinste Zahl entspricht der Kombination **Wand-Luft**, die größte der Paarung **NaCl-CO_2**. Luftbewegungen an den Treibhausfenstern, sowohl innen als auch außen, üben entsprechend einen großen Einfluß auf die Gleichgewichtstemperatur im Labortreibhaus aus, kaum jedoch die Luftbewegung an den Schaumstoff-Wänden.

Strahlungsleistung des Labortreibhauses:

Die innen matt lackierte Weißblechdose deckt fast die gesamte Sichtlinie durch die Einstrahlungsfenster nach innen ab, so daß die direkte Strahlung in Richtung Fensterinnenseite praktisch nur vom Boden der Dose und minimal von den Seiteninnenflächen ausgehen kann. Die Dose hat bei einem Durchmesser von 8 cm eine Bodenfläche von ca. 50 cm² = 5 · 10^{-3} m². Die Strahlungsleistung eines ideal schwarzen Körpers über alle Wellenlängen wird durch das **Stefan-Boltzmann'sche Strahlungsgesetz** beschrieben:

$$\mathbf{P = \sigma \cdot F \cdot T^4\ [W]}$$

Stefan-Boltzmann-Konstante	$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W / m^2 · K^4
Fläche	F = 5 · 10^{-3} m²
Temperatur	T = 60°C = 333°K
Strahlungsleistung des Dosenbodens	P = 5,67 · 10^{-8} · 5 · 10^{-3}· 333^4 = **3,49 W** maximal.

In grober Näherung kann das hier konstruierte Labortreibhaus insgesamt als **Hohlraumstrahler** angesehen werden, allerdings mit starker Störung durch das für unterschiedliche Wellenlängen offene, relativ große Strahlungsfenster. Im Falle des **NaCl**-Fensters, das in weiten Wellenlängen-Bereichen durchlässig ist kann man die **maximale Strahlungsleistung** nach Stefan-Boltzmann bei einem Fenster von **F = 2,40 ·10^{-3} m²** mit **P_{maxaus} = 1,67 W** berechnen. Als Temperatur wird hier wieder **60°C**

angenommen. Umgekehrt strahlt der umgebende Raum, der hier ebenfalls als Hohlraumstrahler angesehen wird, in das Labortreibhaus hinein, allerdings bei einer Temperatur von nur **20°C = 293 K**. Daraus ergibt sich eine Einstrahlungsleistung von $\mathbf{P_{maxein} = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 293^4 = 1{,}00\ W}$. Unter diesen Bedingungen beträgt der maximale Strahlungsverlust also $\mathbf{P_{Fenster} = P_{maxaus} - P_{maxein} = 0{,}67\ Watt}$. Diese letzten Überlegungen wirken etwas befremdlich angesichts einer nahe über dem Fenster intensiv strahlenden Halogenlampe, aber das Labortreibhaus wurde auch, wie weiter unten beschrieben, mit interner Widerstandsheizung betrieben, wo diese Zusammenhänge relevant werden. ***Die hier angedeuteten Gesetzmäßigkeiten und die daraus abgeleiteten Zahlenwerte sind als Orientierungshilfe zur Abschätzung der Strahlungs- und Wärmeverhältnisse des Labortreibhauses zu betrachten, nicht als exakte physikalische Darstellung aller relevanten Parameter.***

Messergebnisse mit Halogenlampe

Raumtemperatur	19 – 20°C		
Halogenlampe	Abstand zum Fenster: 190 mm	$\lambda_{max} \approx 1\ \mu m$	
Filterglasplatte	Abstand zum Fenster: 75 mm	Dicke: 3 mm	Normalglas
Glas-Fenster	50 x 50 x 5,2 mm	effektive Fläche:	49 x 49 mm
NaCl-Fenster	50,4 x 50,8 x 6 mm	effektive Fläche:	49 x 49 mm
Ink-Jet-Folie, gestrippt	70 x 70 x 0,1 mm	effektive Fläche:	49 x 49 mm

Nr.	Datum	Kommentar	Filter	Fenster	Zeit [min]	T_{max} [°C]
1h	05.01.08		-	Glas	90	60,5
2h	06.01.08		+	Glas	92	57
3h	07.01.08		+	Glas	90	57,5
4h	09.01.08	Ink-Jet-Basisfolie(Polyester); Ink-Schicht entf.	+	Folie	70	58
5h	10.01.08	Ink-Jet-Basisfolie(Polyester); Ink-Schicht entf.	-	Folie	70	62
6h	11.01.08		+	NaCl	90	58,5
7h	12.01.08	zus. 33,5 g Glasplatte senkrecht in Dose; Erhöhung der Wärmekapazität	+	Glas	120	57,5
8h	12.01.08	zus. 33,5 g Glasplatte senkrecht in Dose; Erhöhung der Wärmekapazität	+	NaCl	120	58,5
9h	13.01.08	Ventilator mit waag. Luftstrom über Fenster	+	Glas	90	52
10h	14.01.08	Ventilator mit waag. Luftstrom über Fenster	+	NaCl	90	53

Tabelle 1: Messungen mit Halogenlampe

Ein grundsätzliches Problem dieser Versuchsanordnung, das auch von *Wood* sofort bemerkt wurde, ist der unterschiedliche Strahlungseintrag in das Labortreibhaus durch die verschiedenen Fenstermaterialien. Die Sonne und noch mehr die Wolfram-Halogenlampe strahlen ein breites IR-Spektrum aus. Die zwischengeschaltete Filterglasplatte zur IR-Absorption kann das nur ungenügend ausgleichen. So fällt auf, daß unter sonst gleichen Bedingungen mit zwischengeschalteter Filterglasplatte das NaCl-Fenster-Treibhaus trotz höherer Wärmeleitfähigkeit und IR-Durchlässigkeit für langwelliges IR eine höhere Endtemperatur (**Nr. 6h: 58,5°C**) erreicht als das Glas-Fenster-Treibhaus (**Nr. 2h, Nr. 3h: 57-57,5°C**). Auch bei den vergleichbaren Versuchsnummern **7h** und **8h** sowie **9h** und **10h** war stets die Anordnung mit **NaCl**-Fenster ca. **1°C** wärmer. Das kann bei sonst gleicher Versuchsanordnung eigentlich nur einer unterschiedlichen Einstrahlungsleistung zugeordnet werden. *Wood* fand mit seiner Versuchsanordnung unter Sonnenlicht seinerzeit einen etwa gleichgroßen, aber umgekehrten Effekt.

Die Veränderung der inneren Wärmekapazität (**7h** und **8h**) hat erwartungsgemäß keinen Einfluß

auf die erreichte Maximaltemperatur, die sich allerdings erst mit Verzögerung einstellt. Dagegen fällt die innere Maximaltemperatur um mehr als **5°C**, wenn ein äußerer Luftstrom für bessere Wärmeabfuhr sorgt (**9h** und **10h**), wobei die Relation zwischen Glas- und Kochsalzfenster erhalten bleibt (**ΔT ≈ 1°C**). Die höhere **Wärmetransportleistung** des **NaCl**-Fensters von **104 W** gegenüber **14 W** bei **Glas** macht sich hier überhaupt nicht bemerkbar. Der eigentliche Engpaß scheint die Wärmeeinkopplung an den Grenzschichten und die innere und äußere Konvektion zu sein.

Messungen mit Widerstandsheizung

Abbildung 9: *Widerstandsheizung*

Die zwischengeschaltete Filterglasplatte ist kein perfekter IR-Filter, da sie den absorbierten IR-Anteil zumindest teilweise in Richtung Treibhaus-Fenster abstrahlt. Außerdem behindert sie die freie Fenster-Ausstrahlung und die Konvektion. *Diese Probleme hatte Wood mit seiner genügend weit entfernten Sonne natürlich nicht.* Wir verzichten daher im Folgenden auf die direkte Einstrahlung mit ihrer Problematik, da ja eigentlich nur interessant ist, wie ein Treibhaus seine irgendwie eingebrachte Wärme abgibt oder konserviert, denn hier trifft man auf die unterschiedlichsten Interpretationen. Ersetzt man die äußere Strahlungsquelle durch eine leicht regelbare, elektrische Widerstandsheizung im Innern des Labortreibhauses, lassen sich die Einstrahlungsprobleme vollständig umgehen. Die Heizleistung ist durch **U · I** gegeben und läßt sich so regeln, daß etwa die gleichen Endtemperaturen erreicht werden, wie bei Halogenlampen-Einstrahlung. Man kann nun beliebige Fenstermaterialien einsetzen, auch optisch undurchlässige, um z.B. die direkte Strahlungskühlung von anderen Effekten zu trennen. Auch die Emitter-Qualität der Strahlungsdose kann leicht variiert werden. Dadurch sind Messungen mit variabler Strahlungsintensität des Doseninneren möglich.

Technische Ausführung:

Die Heizung besteht aus zwei seriell geschalteten 51 Ohm-Keramikwiderständen, die mit Al_2O_3-gefülltem UHU-plus^R unter eine innen mattschwarz lackierte Weißblechdose geklebt wurden. Daneben sind auf dem Foto zwei Abstandshalter aus Schaumstoff zu sehen, die den direkten Kontakt der Heizung mit dem Treibhausboden verhindern, da das Isoliermaterial örtlich nicht zu heiß werden sollte. Die Heizung wird mit einem Gleichspannungsnetzteil (PeakTech^R 6005D, Reichelt) betrieben. Vergleichende Messungen einer Serie wurden direkt nacheinander ohne Veränderung der Netzteil-Einstellungen durchgeführt.

Messergebnisse mit verschiedenen Fenstern

Raumtemperatur	19 – 20°C		
Heizleistung	N = 200 mA · 20,4 V ≈ 4 Watt		
Glas-Fenster	50 x 50 x 5,2 mm	effektive Fläche:	49 x 49 mm
NaCl-Fenster	50,4 x 50,8 x 6 mm	effektive Fläche:	49 x 49 mm
Alufolie	13 µm dick	Aluminium-Haushaltsfolie	

Nr.	**Datum**	**Kommentar**	**Fenster**	**Zeit [min]**	**T_{max} [°C]**
1	24.01.08		**Glas**	143	63,5
2	25.01.08		**Glas**	205	63

Nr.	Datum	Kommentar	Fenster	Zeit [min]	T_{max} [°C]
3	25.01.08		**NaCl**	205	60,5
4	25.01.08		**NaCl**	220	60,5
5	26.01.08	Alufolie, beidseitig blank	**Alufolie**	180	66,5
6	26.01.08	Alufolie, **innen blank**, außen mattschwarz	**Alufolie + Mattlack**	180	66,5
7	27.01.08	Alufolie, **außen blank**, innen mattschwarz	**Alufolie + Mattlack**	195	65,5
8	27.01.08	Alufolie, beidseitig mattschwarz	**Alufolie + Mattlack**	160	64
9	28.01.08	Alufolie, beidseitig mattschwarz	**Alufolie + Mattlack**	170	64
Zusätzl. NTC-Widerstand zur genaueren Temperaturmessung(0,1°C mit Eichkurve zu Thermoelement) eingebaut; Position nahe Thermoelement Eichgerade, empirisch: x [°C] = 88,927 – 10,714 · y [kOhm] von 58 - 68 °C					
10	05.02.08		**Glas**	153	61,0
11	05.02.08	Strahlungsdose mit Alufolie	**Glas**	185	61,3
12	06.02.08	Strahlungsdose mit Alufolie	**NaCl**	210	62,5
13	06.02.08		**NaCl**	215	60,7
14	06.02.08	Strahlungsdose mit Alufolie	**NaCl**	220	62,5
15	08.02.08	Strahlungsdose mit Alufolie	**Glas**	240	63,2
16	08.02.08		**Glas**	240	63,1
17	08.02.08	Strahlungsdose mit Alufolie	**Glas**	230	63,2
18	11.02.08	Strahlungsdose mit Alufolie	**offen**	170	46,5
19	11.02.08		**offen**	178	46,7
20	12.02.08		**offen**	147	46,7
21	12.02.08	Fenster aus Polyestergarn, anthrazitfarbig(s.u.)	**Fliegengitter**	145	57,4
22	12.02.08	Fenster aus Polyestergarn, anthrazitfarbig(s.u.)	**Fliegengitter**	180	57,2

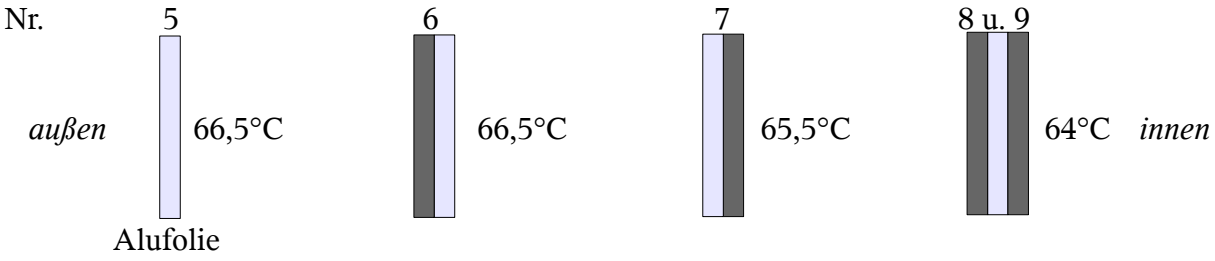
Tabelle 2: Messungen mit verschiedenen Fenstern

Die Messungen 1-4 zeigen deutlich höhere Temperaturmaxima (**63°C** und **63,5°C**) bei Glas als bei NaCl (**60,5°C** und **60,5°C**). Allerdings läßt sich nicht ohne weiteres festlegen, welcher physikalische Effekt hier überwiegt, die direkte Strahlungskühlung (rechnerisch max. **0,67 W** für **NaCl**; s.o.) oder die unterschiedliche Wärmetransportleistung, rechnerische **14 W** für das Glasfenster gegen **104 W** für das **NaCl**-Fenster. Gegenüber der Heizleistung von ca. **4 W** sind beide Werte relativ hoch. Dazu kommt noch ein weiterer Effekt, der die Beurteilung dieser Versuchsergebnisse erschwert:

Die Fenster erwärmen sich durch Kontakt mit der Innenluft und Absorption der inneren Wärmestrahlung. Als guter Absorber für den relevanten Wellenlängenbereich ist Glas aber nach *Kirchhoff* auch ein guter Emitter im selben Bereich und strahlt in alle Raumrichtungen, also auch nach außen. Wegen des Temperaturgradienten über der Schichtdicke des Glases ist die Strahlungsleistung nach außen jedoch geringer als nach innen. NaCl dagegen verliert als schlechter Absorber und Emitter auch nur relativ wenig Wärme durch Abstrahlung.

Ersetzt man die durchsichtigen Fenster durch Aluminium-Folien (**Nr. 5-9**), kann man die direkte Strahlungskühlung ausschalten. Die beidseitig blanke Alufolie als Fenster führt zu einer relativ hohen

Maximaltemperatur von **66,5°C**. Denselben Wert erreicht man mit schwarzem Mattlack auf der Folien-Außenseite, ein Zeichen, daß die Strahlungs-Reflexion nach innen an der Temperaturerhöhung beteiligt ist. Da wenig Energie eingekoppelt wird, kann auch wenig über die an sich gut strahlende Außenschicht abgegeben werden. Beiseitig matt lackierte Folien ergeben **64°C**, eine Folie mit einseitigem Innen-Mattlack liegt mit **65,5°C** dazwischen. Unterschiede in der kinetischen Wärmeeinkopplung zwischen *blank* und *matt* können eine Rolle spielen und die Strahlungseffekte relativieren. Dagegen scheint die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums **[Al=221 W/(m·K); Glas=0,76 W/(m·K)]** nicht wesentlich zu sein, solange keine wirksame Wärmeeinkopplung über die Gasphase erfolgen kann.



Zur Temperaturmessung wurde bis hierher ein Digitalthermometer mit **1°** Anzeigegenauigkeit verwendet. Die Nachkommastelle wurde über die Wechselzeiten zwischen zwei Werten geschätzt. Um eine verläßlichere Nachkommastelle zu erhalten, wurde ab hier ein NTC-Widerstand mit Eichkurve für den relevanten Temperaturbereich eingesetzt.

Variation der Abstrahlungsleistung

Bei gleicher Heizleistung sollte eine Verringerung der Abstrahlung zu einer höheren Innentemperatur führen. Dazu wurde die Strahlungsdose innen vollständig mit glatter Alufolie ausgekleidet und das Labortreibhaus mit verschiedenen Fenstern verschlossen. Vergleicht man **zeitnahe** Messwerte, so erhält man für die Glasfenster-Varianten (**Nr. 10-11 u. 15-16-17**) nur um **0,3°C** bzw. **0,1°C** differierende Maximaltemperaturen zwischen ausgekleideter und nicht ausgekleideter Strahlungsdose. Da die direkte Strahlungskühlung wegen des absorbierenden Fensterglases sowieso nicht möglich ist, findet man hier praktisch keinen Effekt. Anders beim NaCl-Fenster (**Nr. 12-13-14**), wo die Temperatur des Treibhauses mit Alu-Auskleidung um **1,8°C** höher liegt. Hierfür scheint die **Strahlungskühlung** bzw. deren Fehlen verantwortlich zu sein.

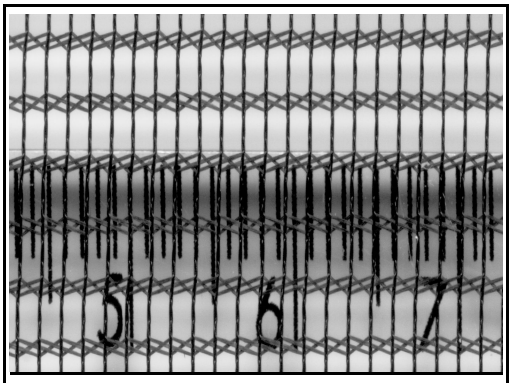


Abbildung 10: *Fliegengitter + Lineal*

Und was macht die innere Konvektion?

Die Messwerte **Nr. 18, 19 u. 20** sind mit offenen Treibhausfenstern entstanden, wo die innere Thermik nur durch die restliche Treihauskonstruktion behindert oder gefördert wird. Das Temperaturniveau liegt mit Alu-Auskleidung um **16°C** unter dem vergleichbaren NaCl-Fenster-Niveau und um **16,7°C** unter dem vergleichbaren Glas-Fenster-Niveau. Die Differenz zu nicht ausgekleideter Strahlungsdose beträgt nur **-0,2°C**. Konvektionshindernisse führen zu erheblichen Temperaturdifferenzen, wie die Messungen **Nr. 19-22** zeigen:

Ein Fliegengitter aus organischer Faser als Fenster, hier vergrößert mit unterlegtem Lineal abgebildet, führt gegenüber dem offenen Fenster bereits zu einer Temperaturerhöhung von über **10°C** im Labortreibhaus, obwohl kaum **5%** der Fläche bedeckt sind. Es reicht aber aus, um die Konvektion stark zu behindern. Selbst zwei zentimetergroße Löcher in diesem Gitter ergaben praktisch die gleichen Temperaturmaxima (Messwerte nicht tabellarisch erfaßt).

Die Wirkung unterschiedlicher Füllgase

Kohlendioxid ist im auch wahrsten Sinne des Wortes *in Aller Munde.* Dem Anstieg der **CO_2**- Konzentration in neuerer Zeit werden klimarelevante Wirkungen zugeschrieben und die

Diskussionen darüber haben den Charakter von Glaubenskriegen angenommen. Das liegt vor allem an Katastrophen-Propheten, die ihre politisch-religiöse Suppe kochen und denen an der Klärung physikalischer Zusammenhänge nicht so sehr gelegen ist. Möglicherweise eignet sich das **NaCl**-Treibhaus als Mess-Sonde für Treibhausgase.

Was macht das **CO_2**, das nur **0,038 Vol.%** der Luft ausmacht, so interessant?

1. **CO_2** absorbiert Wärmestrahlung und gibt sie auch wieder ab. Das können die Hauptbestandteile der Luft, Stickstoff(ca.79%), Sauerstoff(ca.20%) und Argon(ca.1%) nicht. Allerdings kollidiert das Kohlendioxid-Molekül in der kurzen Zeit zwischen Absorption und Abstrahlung unter Normaldruck tausendfach mit Nachbarmolekülen, die ihm die Absorptionenergie quasi durch die Hintertür abnehmen und sich dabei erwärmen[**4**]. Das wäre dann der normale Treibhauseffekt ohne *Deckel*, also mit unbehindertem Warmluftaufstieg. Ein zusätzlicher Treibhauseffekt, bei dem die Physik nicht so richtig mitspielen will[**1**], soll sich aus einem Rückstrahlungsanteil angeregter **CO_2**-Moleküle in Richtung Erdoberfläche ergeben. Die Rückstrahlung zur Erdoberfläche funktioniert aber nicht so richtig in Bodennähe wegen der Kollisionen mit den Luftmolekülen. Wo aber dann? - Dort, wo die Luft in großer Höhe dünn wird und die Nachbarmoleküle nicht so drängeln! Wie aber kommt die Wärmestrahlung der richtigen Wellenlängen vom Boden in die großen Höhen, wenn dazwischen dicke, absorbierende Schichten liegen und vor allem, wie kommt sie wieder heil zur Erdoberfläche zurück? - Gute Fragen an Herrn Gore &. Co.!
2. **CO_2** leitet die Wärme merklich schlechter als Luft [**CO_2: λ_{th}=0,015 W/(m·K); Luft: λ_{th}=0,024 W/(m·K)**]. Dieser Tatbestand wird bei einfachen Demonstrationen zum *Treibhauseffekt* mit **CO_2**-gefüllten Kammern (und kräftiger Beleuchtung!) oft unerwähnt gelassen. Dabei beruht z.B. die besonders gute Wärmeisolation einiger geschlossenzelliger Polyurethan-Schaumstoffe auf eben dieser **CO_2**-Füllung.

Als idealer und praktisch einziger Vergleichspartner zur **Wärmeleitfähigkeit** eignet sich hier das Edelgas **Argon** mit **λ_{th}=0,016 W/(m·K)** und damit fast dem gleichen Wert wie **CO_2. Argon** ist chemisch inert und greift deshalb die Isolierwände des Labortreibhauses nicht an. Das Atomgewicht und damit die Dichte von Argon bei Raumbedingungen liegt in der Nähe vom Molekulargewicht des **CO_2** (**40:44**). Argon absorbiert als einatomiges Edelgas **keine** Wärmestrahlung, ist in Druckflaschen leicht zu beschaffen, gut handhabbar und auch in reiner Form noch relativ preiswert.

Welchen Temperatureffekt können wir mit einem CO_2-gefüllten Labortreibhaus gegenüber einer normalen Luftfüllung erwarten?

Zunächst einmal sollte die schlechtere Wärmeleitfähigkeit des **CO_2** - sie beträgt nur **62%** des Luftwertes - eine **Temperaturerhöhung** bewirken, da der Wärmetransport mindestens in den quasi-ruhenden Grenzschichten der inneren Treibhausteile behindert wird. Die von den inneren schwarzen Flächen abgegebene **Infrarotstrahlung** im Bereich von ca. **3 - 20 µm** wird zum Teil (s. Grafik unten) von einer ca. **10 cm** dicken **CO_2**-Schicht absorbiert. Die durchstrahlte Schicht im Treibhaus enthält die gleiche Anzahl **CO_2**-Moleküle wie eine entsprechende Luftsäule von **263 m** Höhe:

$$\mathbf{d_{Luft} = d_{CO2} \times 100\% / 0{,}038\% = 263\ m}$$

Die von der inneren Heizung erzeugte Wärme wird durch Wandkontakt in Form kinetischer Energie und durch Wärmestrahlung an das **CO_2** übergeben. Auf dem gleichen Wege wird die Wärme u.a. am **NaCl**-Strahlungsfenster nach außen transportiert. Da wir an eventuell wirksamen Strahlungsphänomenen interessiert sind, wird das **NaCl**-Fenster als Treibhaus-Abschluß gewählt, das der austretenden Wärmestrahlung einen möglichst geringen Widerstand entgegensetzt. Bei Normaldruck findet wegen der oben erwähnten Kollisionen zwischen den Gasmolekülen neben der permanenten Absorption und Desorption von Strahlung durch das **CO_2** auch eine dauernde Umwandlung in kinetische Energie des Gases statt, was der normalen Erwärmung entspricht. Darüberhinaus wird nur ein kleinerer Teil des Schwarzkörperspektrums von der **CO_2**-Absorption betroffen(s.u.). Wenn dies so zutrifft, sollte sich kein wesentlicher Temperatur-Effekt ergeben, der über den der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit hinausgeht.

Wärmekapazität:	Cp(25°C)	CO_2	37,2	J / (Mol · K)
		O_2	29,2	"
		N_2	29,1	"
		Ar	20,8	"

CO_2 hat von den verwendeten Gasen die höchste Wärmekapazität. Wie in den Versuchen **Nr. 7h u. 8h** jedoch nachgewiesen wurde, hat die Wärmekapazität keinen Einfluß auf das thermische Gleichgewicht, obwohl die **CO_2**-Füllung die Gleichgewichtseinstellung zeitlich etwas verzögern dürfte.

Die elektromagnetische Ausstrahlung des Labortreibhauses und die Hauptabsorptions-Wellenlängen des **CO_2** im relevanten Temperaturbereich sind der folgenden Grafik dargestellt:

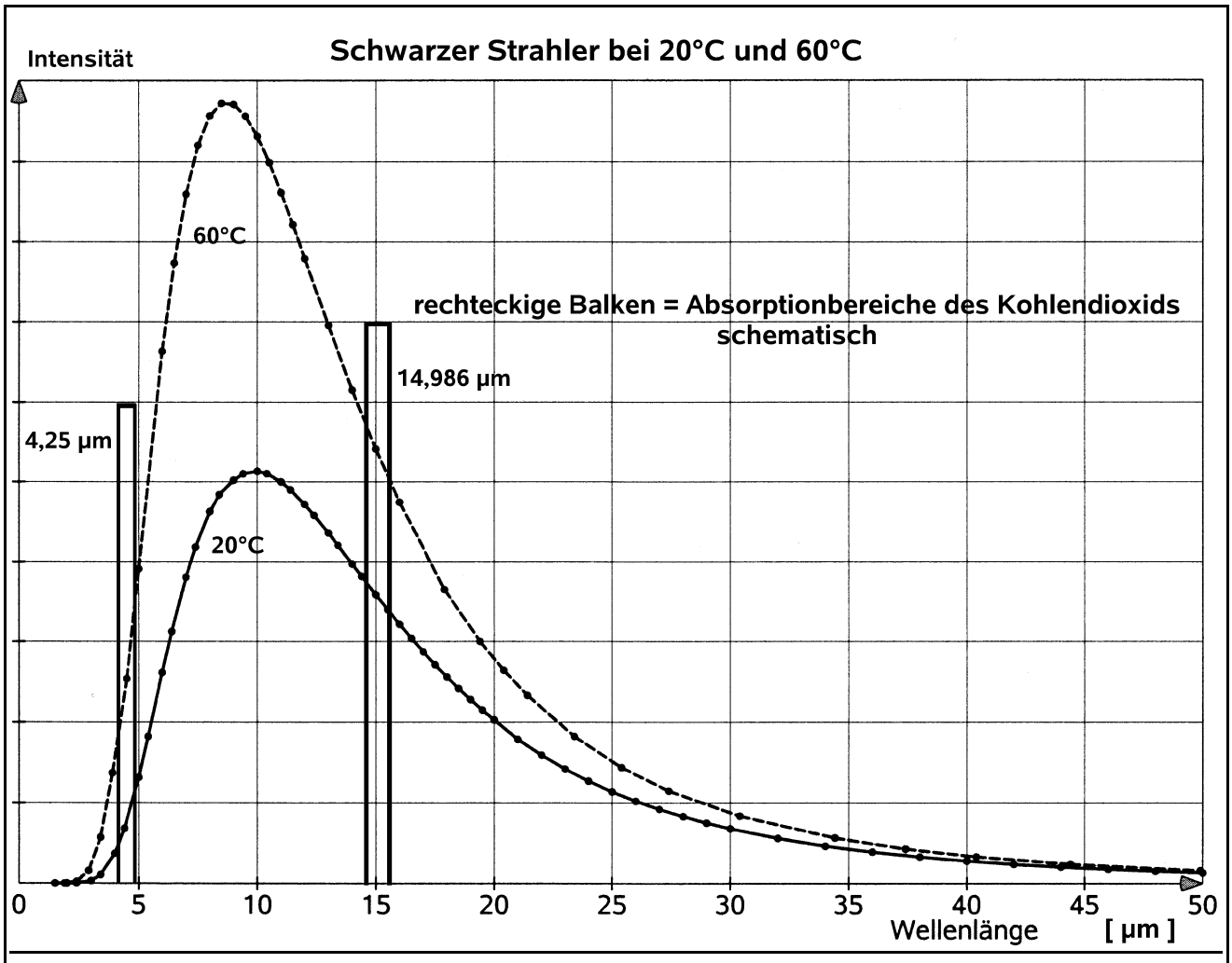


Abbildung 11: *Emissionskurven schwarzer Strahler und **CO_2**-Absorptionsmaxima. Ein passendes CO_2-Spektrum stand nicht zur Verfügung. Die Balken zeigen nur die Absorptions-Maxima in willkürlicher Höhe und Breite an.*

Die Absorptionsbanden des **CO_2** liegen zwar nicht bei den Strahlungsmaxima der Schwarzkörperstrahlung, aber immerhin überlappen sie merklich mit der **60°C**–Strahlungskurve. Auch den Durchgang durch das **NaCl**-Fenster sollte die **60°C**-Strahlung weitghend unbehelligt schaffen. Daher sollten temperaturwirksame Strahlungs- und Absorptionphänomene eigentlich am Innenthermometer des Treibhauses sichtbar werden.

Versuchsdurchführung:

Abbildung 12: CO_2 aus Sprudelgerät

Kohlendioxid wird über einen handelsüblichen Apparat zur Erzeugung von Sprudelwasser gewonnen. Statt der untergeschraubten Druckflaschen wird ein 20 cm langes Schlauchstück über die äußere Sprudeldüse gestülpt, dessen innerer Durchmesser groß genug ist, um die vorschnellende innere Sprudeldüse aufzunehmen. An dieses Schlauchstück wird ein dünnerer Schlauch adaptiert, der wiederum an einen Polyethylenbeutel von ca. 0.5 l Inhalt gasdicht angeschlossen ist. Dieser Beutel wird nach jeder CO_2-Füllung durch leichten, beidhändigen Druck langsam über ein zweites Schlauchstück in das Labortreibhaus entleert. Der verwendete Sprudelautomat verwendet 50 bar-Druckgasflaschen mit CO_2 von mindestens 99,9% Reinheit. Die Gasmenge pro Tastendruck läßt sich in 6 Stufen einstellen. Die Beutelgröße wurde so gewählt, daß bei kleinster Dosierstufe der Beutel knapp gefüllt wird. Pro Versuch wurden insgesamt fünf Beutelfüllungen dem Treibhaus zugeführt.

Argon wird direkt über einen Druckminderer aus einer 200 bar-Druckgasflasche für Industriezwecke (Schutzgas-Schweißen) in das Treibhaus geleitet (5 x 2 min). Das Argon hat eine Reinheit von > 99,9%.

Das Treibhaus wird von oben mit dem jeweiligen Gas geflutet und dann mit Klebeband verschlossen. Nach ca. einer und zwei Stunden wird jeweils über eine verschließbare Bohrung im oberen Bereich nachgeflutet, um eventuelle Gasverluste auszugleichen. Das nachströmende, kalte Gas bewirkt zunächst einen sichtbaren Temperaturabfall und zeigt damit die Wirksamkeit der Gaszufuhr an. Nach der letzten Gasergänzung wird nach frühestens 45 Minuten die erreichte Endtemperatur abgelesen.

Messergebnisse mit verschiedenen Gasfüllungen am NaCl-Fenster (I)

Raumtemperatur	19 – 20°C		
Heizleistung	N = 200 mA · 20,4 V ≈ 4 Watt		
Glas-Fenster	50 x 50 x 5,2 mm	effektive Fläche:	49 x 49 mm
NaCl-Fenster	50,4 x 50,8 x 6 mm	effektive Fläche:	49 x 49 mm

Nr.	Datum	Kommentar	Gas	Fenster	Zeit [min]	T_{max} [°C]
1	16.02.08		**CO_2**	Glas	207	63,6
2	17.02.08		**CO_2**	Glas	185	62,5
3	17.02.08		**CO_2**	NaCl	210	61,3
4	17.02.08		**Luft**	NaCl	215	60,7
5	18.02.08		**Luft**	NaCl	210	60,4
6	18.02.08		**CO_2**	NaCl	210	61,1
7	18.02.08		**CO_2**	NaCl	267	61.9
8	19.02.08		**CO_2**	NaCl	240	61,8

Nr.	Datum	Kommentar	Gas	Fenster	Zeit [min]	T_{max} [°C]
9	19.02.08		**Luft**	NaCl	252	61,0
10	19.02.08		**CO_2**	NaCl	180	61,9
11	20.02.08		**CO_2**	NaCl	180	61,9
12	20.02.08		**Luft**	NaCl	215	61,1
zusätzliche, äußere Bodenisolierung mit 3 cm Styrodur^R						
13	20.02.08		**Luft**	NaCl	197	61,8
14	20.02.08		**CO_2**	NaCl	213	62,7
15	21.02.08		**CO_2**	NaCl	252	62,6
16	22.02.08		**Luft**	NaCl	210	62,0
17	22.02.08		**CO_2**	NaCl	220	63,1
18	22.02.08		**Luft**	NaCl	220	61,9
19	23.02.08		**Luft**	NaCl	215	61,8
20	23.02.08		**CO_2**	NaCl	212	62,9
21	23.02.08		**Luft**	NaCl	215	62,2
22	23.02.08		**CO_2**	NaCl	215	62,8
23	24.02.08		**CO_2**	NaCl	210	62,7
24	24.02.08		**CO_2**	NaCl	204	63,0
NTC innen korrigiert – Kabel berührte Dose; Neue Eichgerade, empirisch: x [°C] = 85,75 – 9,90 · y [kOhm] von 55-63°C						
25	26.02.08		**CO_2**	NaCl	240	59,5
26	26.02.08		**Luft**	NaCl	240	58,3
27	26.02.08		**CO_2**	NaCl	180	59,4
28	27.02.08		**Luft**	NaCl	240	57,5
CO_2-Beutel abgedichtet						
29	27.02.08		**CO_2**	NaCl	202	59,2
30	27.02.08		**Luft**	NaCl	225	58,4
31	28.02.08		**CO_2**	NaCl	210	60,0
32	29.02.08		**CO_2**	NaCl	210	59,5
NaCl-Fenster nachpoliert						
33	29.02.08		**Luft**	NaCl	221	58,8
34	29.02.08		**CO_2**	NaCl	247	59,6
35	29.02.08		**Luft**	NaCl	207	58,6
36	01.03.08		**Luft**	NaCl	217	58,1
37	01.03.08		**CO_2**	NaCl	255	59,5
38	01.03.08		**Luft**	NaCl	210	58,7
39	01.03.08		**CO_2**	NaCl	205	58,9
NaCl-Fenster nachpoliert						

Nr.	Datum	Kommentar	Gas	Fenster	Zeit [min]	T_{max} [°C]
40	02.03.08		**Argon**	NaCl	217	59,1
41	02.03.08		**Luft**	NaCl	210	58,9
42	02.03.08		**CO_2**	NaCl	242	60,1
43	02.03.08		**Argon**	NaCl	214	59,6
44	03.03.08		**Luft**	NaCl	222	57,9
45	03.03.08		**Argon**	NaCl	216	58,9
46	03.03.08		**CO_2**	NaCl	268	59,3
47	04.03.08		**Luft**	NaCl	201	58,6
48	04.03.08		**CO_2**	NaCl	240	59,7
49	04.03.08		**Argon**	NaCl	260	59,3
50	04.03.08		**Luft**	NaCl	216	59,0
51	05.03.08		**CO_2**	NaCl	213	59,6
NaCl-Fenster nachpoliert						
52	05.03.08		**Argon**	NaCl	240	59,6
53	05.03.08		**Luft**	NaCl	210	59,0

Tabelle 3: Messungen mit verschiedenen Gasfüllungen(elektr. Thermometer)

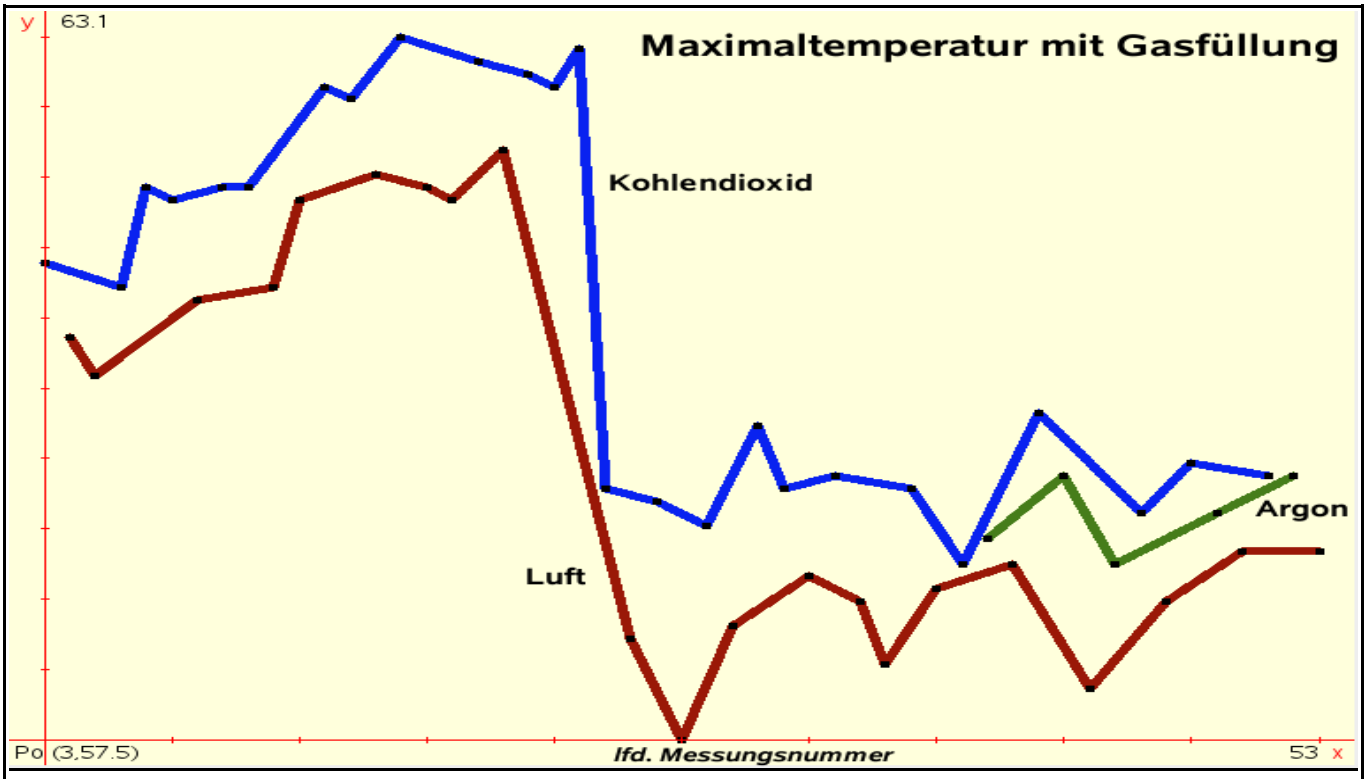


Abbildung 13: *Treibhaus mit Gasfüllung 1 – Maximaltemperaturen - Messwerte Nr.3-53 –* ***NaCl****-Fenster [Die durchgezogenen Linien haben keine physikalische Bedeutung. Sie zeigen nur zusammengehörende Messwerte an.]*

Trotz der erheblichen Schwankungen der Messwerte auch innerhalb der Gruppen zeigt sich eine bemerkenswerte Tendenz. Wenn die Maximaltemperaturen durchgängig in ihrer zeitlichen Abfolge auf der Abszisse eingetragen und gruppenmäßig mit Linien verbunden werden, erhält man parallele Kurvenzüge, die recht gut zu den unterschiedlichen **Wärmeleitfähigkeiten** der Gase passen. Dabei schlagen sich in dieser Messreihe apparative Probleme, Raumklima-Schwankungen und Verfahrensänderungen direkt im Kurvenverlauf nieder. Zum Beispiel zeigen die kontinuierlich ansteigenden Werte zu Beginn die langsame Annäherung des NTC-Widerstandes im Inneren des Labortreibhauses an die Metallwand der Strahlungsdose im Laufe der Messungen. Dies wurde ungewollt durch Drehung der äußeren Zuführungsdrähte beim Umrüsten und Füllen des Treibhauses herbeigeführt und war nicht leicht zu erkennen. Die Fixierung des NTC mit anschließend neuer Eichgeraden führte zum scharfen, allgemeinen Messwert-Abfall.

Während dieser Messreihe wurde einige Male das **NaCl**-Fenster nachpoliert, da auf der Innenseite leichte Trübungen zu bemerken waren, vor allem nach längeren Heizphasen und anschließender Abkühlung bei geschlossenem Strahlungsfenster. Es hatten sich kolophoniumartige Ablagerungen gebildet, die optisch nicht sehr auffällig waren, sich aber bei der Politur durch deutliche Reibungswiderstände bemerkbar machten. Als Quelle dieser Stoffe ist wohl der Mattlack der Strahlungsdose anzusehen, da die Trübungen mit der Zeit weniger wurden. Interessanterweise fanden sich auf den Glasfenstern keine solche Ablagerungen. Möglicherweise wirkt das **NaCl**-Fenster wegen seiner höheren Wärmeleitfähigkeit als bessere Kühlfalle. Wegen dieser mehrfachen Unzulänglichkeiten der Messreihe wurde das Labortreibhaus umgerüstet und eine neue Messreihe begonnen. Zudem waren sowieso nicht genug Argon-Vergleichswerte vorhanden.

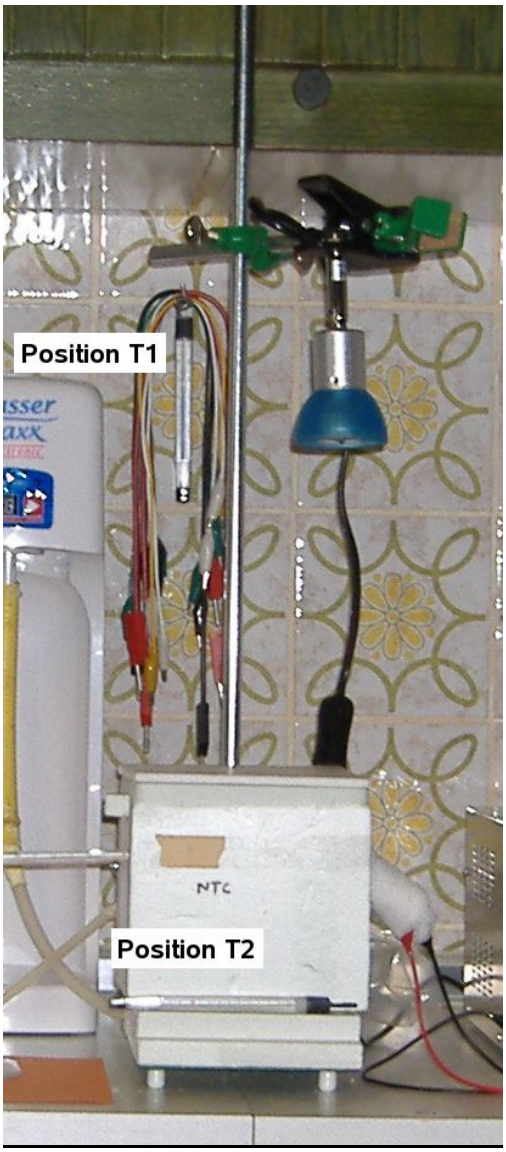


Abbildung 14: *Thermometer-Positionen*

Die Maßnahmen im Einzelnen:

1.) Die elektrischen Thermometer mit ihren Zuleitungen wurden entfernt und stattdessen ein Quecksilber-Thermometer an der gleichen Messposition unverrückbar fixiert. Bei diesem Thermometer mit **1°**-Teilung läßt sich mit Lupe eine Nachkommastelle recht gut abschätzen. Es weist eine höhere Wärmekapazität auf und reagiert nicht so empfindlich auf äußere Einflüsse, da der hohle Glaskörper ein schlechter Wärmeleiter ist. Auf eine Fadenkorrektur wurde verzichtet, da hier nur Relativwerte von Belang sind und die Fadenlängen nur wenig voneinander abweichen.

2.) Das **NaCl**-Fenster wurde sofort nach jeder Messung demontiert, mit einem Leinentuch poliert und in einem Exsikkator mit Trockenmittel gelagert.

3.) Nach einigen Vorlauf-Messungen mit der umgebauten Apparatur wurde immer deutlicher, daß die Schwankungen der Umgebungsbedingungen mit der Regelung durch die Raumheizung nicht mehr aufgefangen werden konnten. Daher wurden die Raumtemperaturen in der Labortreibhaus-Umgebung mit aufgenommen, um auch Differenzwerte auswerten zu können. Es entstanden zwei Messreihen mit unterschiedlichen Raumthermometer-Positionen **T1** und **T2**. **T1** ist etwas kritisch zu sehen, da die Abwärme des Netzteils unter den vorstehenden Hängeschränken entlangzieht. Allerdings hätte jede andere Position auch ihre Schwächen.

4.) Um tageszeitlich bedingte Temperatur-Effekte auszugleichen, wurden die Messzeiten quer durch alle Gruppen möglichst gleichmäßig verteilt.

Messergebnisse mit verschiedenen Gasfüllungen am NaCl-Fenster (II)

Elektrische Thermometer entfernt; Durchbrüche abgedichtet; Hg-Thermometer mit 1°-Teilung an der selben Stelle installiert; mit Lupe auf +-0,1° ablesbar; Fenster nach jeder Messung nachpoliert;

Fenster	**NaCl**, wenn nicht anders vermerkt		
Raumtemperatur	19 – 20°C		
Heizleistung	N = 200 mA · 20,6V ≈ 4 Watt		
Glas-Fenster	50 x 50 x 5,2 mm	effektive Fläche:	49 x 49 mm
NaCl-Fenster	50,4 x 50,8 x 6 mm	effektive Fläche:	49 x 49 mm

Nr.	Datum	Kommentar	Gas	Zeit [min]	RT [°C]	Tmax [°C]	ΔT [°C]
54	31.03.08	Startzeit: 19:00 - Glasfenster	**Luft**	188	-	60,0	-
55	01.04.08	Startzeit: 9:00 - Glasfenster	**Luft**	220	-	59,4	-
56	01.04.08	Startzeit: 21:00 - Glasfenster	**Luft**	217	-	59,6	-
57	15.04.08		**Luft**	240	-	57,4	-
58	15.04.08		**CO_2**	257	-	58,6	-
59	15.04.08		**Argon**	242	-	58,7	-
60	16.04.08		**Argon**	280	-	58,5	-
61	16.04.08		**Luft**	235	-	58,2	-
62	16.04.08		**CO_2**	240	-	59,0	-
63	17.04.08		**CO_2**	192	-	58,6	-
64	18.04.08		**Argon**	180	-	58,0	-
65	18.04.08		**CO_2**	200	-	58,2	-
66	18.04.08		**Luft**	195	-	57,7	-
67	18.04.08		**Argon**	222	-	58,1	-
Raumtemperatur bei Ende der Messung; Thermometer oben+30cm, hinten+40cm							
68	19.04.08		**CO_2**	212	19,2	57,9	38,7
69	19.04.08		**Luft**	230	19,2	57,1	37,9
70	19.04.08		**Argon**	218	20,4	59,0	38,6
71	20.04.08		**Argon**	180	20,0	58,0	38,0
72	20.04.08		**CO_2**	190	20,0	58,5	38,5
73	20.04.08		**Luft**	160	20,2	58,3	38,1
74	21.04.08		**Luft**	202	20,2	57,9	37,7
75	21.04.08		**Argon**	205	20,9	59,0	38,1
76	21.04.08		**CO_2**	227	20,5	59,0	38,5
77	22.04.08		**Argon**	204	20,1	58,0	37,9
78	22.04.08		**CO_2**	210	20,7	59,0	38,3
79	22.04.08		**Luft**	185	20,2	58,0	37,8
80	23.04.08		**CO_2**	226	19,0	57,0	38,0
81	23.04.08		**Luft**	216	19,5	57,0	37,5

Nr.	Datum	Kommentar	Gas	Zeit [min]	RT [°C]	Tmax [°C]	ΔT [°C]
82	23.04.08		**Argon**	180	19,8	58,0	38,2
83	23.04.08		**CO_2**	205	19,0	57,5	38,5
84	24.04.08		**Luft**	180	18,1	55,7	37,6
85	24.04.08		**Argon**	212	18,7	56,5	37,8
86	24.04.08		**CO_2**	196	20,6	58,6	38,0
87	24.04.08		**Luft**	225	20,3	58,2	37,9
88	25.04.08		**Argon**	213	20,0	58,0	38,0
89	25.04.08		**Luft**	210	20,9	58,2	37,3
90	26.04.08		**CO_2**	192	20,0	58,2	38,2
91	26.04.08		**Argon**	192	20,7	58,4	37,7
92	26.04.08		**Luft**	207	21,0	58,7	37,7
93	26.04.08		**CO_2**	230	20,1	58,0	37,9
94	27.04.08		**Argon**	250	21,0	58,4	37,4
Raumtemperatur bei Ende der Messung; Thermometer am Sockel der Messkammer							
95	27.04.08		**Luft**	287	19,8	57,8	38,0
96	28.04.08		**CO_2**	202	19,0	57,8	38,8
97	28.04.08		**Argon**	209	19,2	57,2	38,0
98	28.04.08		**Luft**	185	19,4	57,0	37,6
99	28.04.08		**CO_2**	226	19,0	57,1	38,1
100	02.05.08		**Luft**	220	20,0	57,7	37,7
101	02.05.08		**Argon**	258	19,6	57,6	38,0
102	02.05.08		**CO_2**	215	20,1	58,2	38,1
103	03.05.08		**Argon**	181	20,1	58,1	38,0
104	03.05.08		**Luft**	174	20,3	57,1	36,8
105	04.05.08		**Luft**	172	20,1	57,8	37,7
106	04.05.08		**Argon**	207	20,0	58,2	38,2
107	04.05.08		**CO_2**	230	19,8	58,0	38,2
108	05.05.08		**Argon**	200	20,7	58,7	38,0
109	05.05.08		**Luft**	225	20,5	58,3	37,8
110	05.05.08		**CO_2**	240	20,4	59,0	38,6
111	06.05.08		**Luft**	262	20,8	58,5	37,7
112	06.05.08		**CO_2**	191	20,5	58,6	38,1
113	06.05.08		**Argon**	190	20,2	58,7	38,5
114	07.05.08		**CO_2**	218	21,1	59,4	38,3
115	07.05.08		**Argon**	211	20,2	58,8	38,6

Nr.	Datum	Kommentar	Gas	Zeit [min]	RT [°C]	Tmax [°C]	ΔT [°C]
116	07.05.08		**Luft**	210	20,0	58,0	38,0
117	08.05.08		**Argon**	241	20,3	58,8	38,5
118	09.05.08		**CO_2**	205	20,6	58,6	38,0
119	09.05.08		**Luft**	180	20,8	58,5	37,7
120	09.05.08		**Argon**	232	21,5	59,4	37,9
121	09.05.08		**CO_2**	178	21,4	60,0	38,6
122	10.05.08		**Luft**	174	21,4	58,9	37,5
123	10.05.08		**CO_2**	204	21,8	60,0	38,2
124	10.05.08		**Argon**	182	21,9	60,1	38,2
125	11.05.08	+ Ventilator mit waag. Luftstrom	**Luft**	210	22,8	56,7	33,9
126	11.05.08	+ Ventilator mit waag. Luftstrom	**CO_2**	208	22,6	56,6	34,0
127	11.05.08	+ Ventilator mit waag. Luftstrom	**Argon**	189	22,2	56,4	34,2
128	12.05.08	+ Ventilator mit waag. Luftstrom	**Argon**	295	22,4	56,5	34,1
129	12.05.08	+ Ventilator mit waag. Luftstrom	**CO_2**	202	23,2	56,9	33,7
130	12.05.08	+ Ventilator mit waag. Luftstrom	**Luft**	231	22,9	57,0	34,1

Tabelle 4: Messungen mit verschiedenen Gasfüllungen(Hg-Thermometer)

Der Versuchsaufbau liefert physikalisch bedingt keine wesentlich genaueren Daten. Das liegt jedoch weniger an den Messgeräten als an den Bedingungen der Umgebung. Dabei spielt das Wetter eine erhebliche Rolle. Wie das in einem geschlossenen Raum???

1.) Bei niedrigen Außentemperaturen werden die Raum-Heizkörper wärmer, sind auch länger warm und erzeugen im Raum stärkere Luftumwälzungen. Die Wirkung von **Luftbewegungen** auf die Gleichgewichtstemperatur im Labortreibhaus kann an den diversen Ventilator-Messungen abgelesen werden **(Nr. 9h, 10h, 125-130)**. Vergleicht man die jeweils letzten beiden **ΔT**-Werte für **Luft, Argon** und **CO_2** mit und ohne Ventilator in der Reihe **Nr. 119-130**, ergeben sich Temperturabsenkungen von **3,6°C** für **Luft**, **4,0°C** für **Argon** und **4,6°C** für **CO_2** bei Ventilatorbetrieb. Sie übersteigen damit die Messwert-Differenzen zwischen den Gasen teilweise um mehr als den Faktor 10. [Die Abstufung in den letzgenannten Werten ist bemerkenswert, kann aber erst in zukünftigen Messreihen verifiziert werden. Die vorhandenen Einzelwerte geben für eine Diskussion nicht genug Sicherheit.]
2.) Zwar kann das Raum-Thermometer die Lufttemperatur anzeigen und der Raum wird auch über die Luft-Temperatur thermostatiert, aber es existiert nur eine geregelte ***Heizung***. Die zur Regelung erforderliche ***Kühlung*** erfolgt über Wände und Fenster, deren Temperatur wiederum dem stark schwankenden Wettereinfluß und der Sonneneinstrahlung unterliegt. Die **Wärmestrahlung** der Wände geht nicht direkt in die Lufttemperatur ein, wohl aber in die Strahlungsbilanz des Labortreibhauses.
3.) Die **Luftfeuchtigkeit** konnte nicht berücksichtigt werden. Versuche mit Wasserdampf verbieten sich wegen des wasserlöslichen Fenstermaterials.

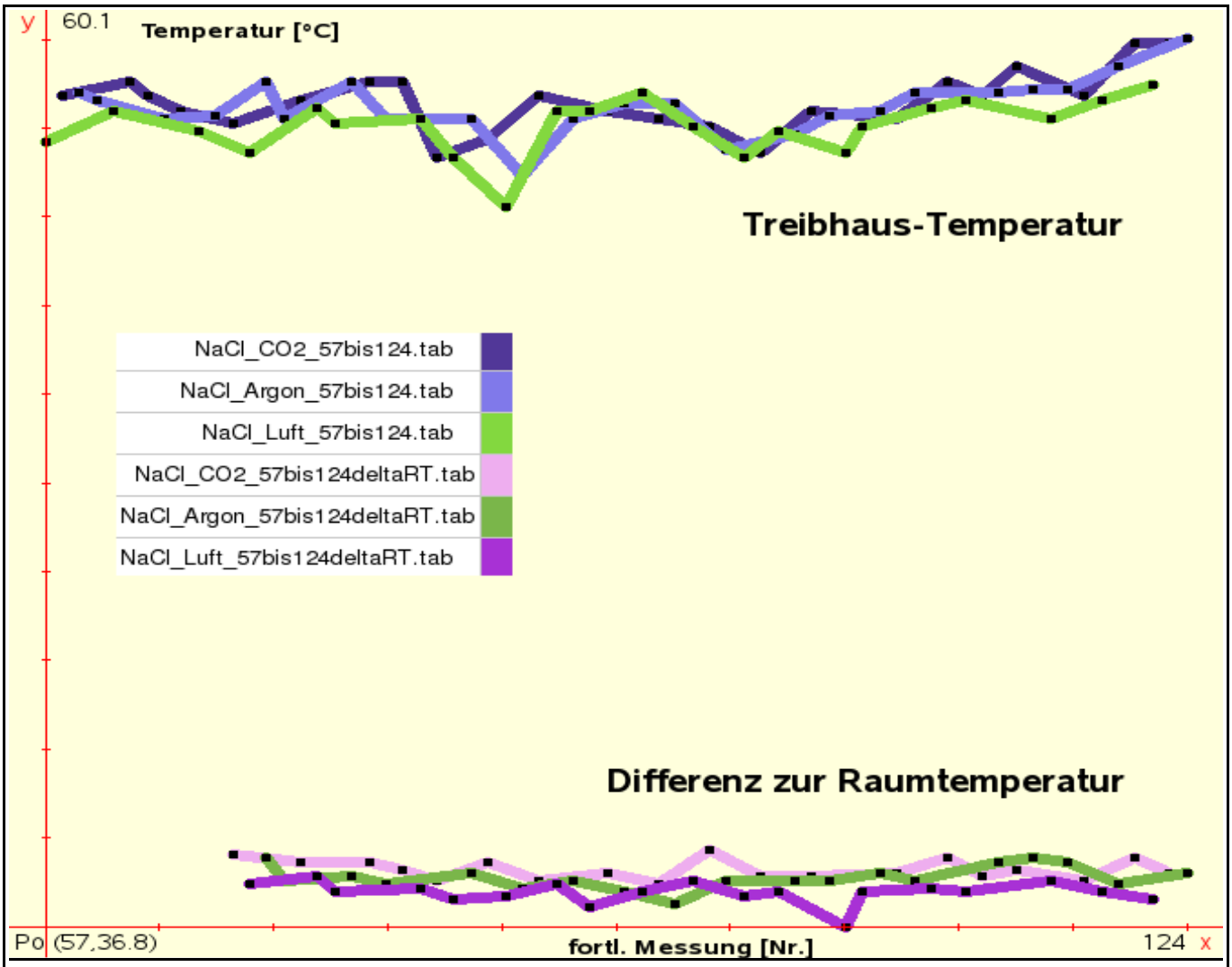


Abbildung 15: *Messwerte mit verschiedenen Gasfüllungen II -* ***NaCl****-Fenster*

Die Grafik **Abb. 15** zeigt die zusammengefaßten Messwerte der **Tabelle 4**. Durch die Differenzbildung zur Umgebungstemperatur erfolgt eine sichtbare Glättung der Kurven, die nur durch zwei Ausreißer-Punkte gestört wird. Die folgenden zwei Tabellen sind eine Zusammenfassung der Messungen **Nr. 68-124**, geordnet nach **Thermometer-Position** und Füllgas. Es wurde für jede Gruppe das arithmetische Mittel der Temperatur-Differenzen von Treibhaus und Raum berechnet. Die Differenzen dieser Mittelwerte zwischen den Gruppen sind in der letzten Zeile angegeben. **Die Differenzen sind klein**, korrelieren anscheinend aber mit den **Wärmeleitfähigkeiten** der Gase. In der verläßlicheren **Tabelle B / T2** (s.o.) wird als Differenz zwischen **CO_2** - und **Argon**-Füllung eine durchschnittliche Temperaturdifferenz von nur **0,11°C** ermittelt. Viel Raum für strahlungsbedingte Temperatureffekte durch **CO_2** bleibt hier nicht, wenn mit dem einatomigen Edelgas **Argon** ohne jede Absorption im Infrarot fast derselbe Effekt erreicht wird!

Vergleichstabelle Gasfüllung A:			RT-Thermometer oben+30cm hinten+40cm	T1					
Nr.	Gas	Ref.- Nr.	ΔT [°C]	Gas	Ref.- Nr.	ΔT [°C]	Gas	Ref.- Nr.	ΔT [°C]
1A	Argon	70	38,6	CO_2	68	38,7	Luft	69	37,9
2A	Argon	71	38,0	CO_2	72	38,5	Luft	73	38,1
3A	Argon	75	38,1	CO_2	76	38,5	Luft	74	37,7
4A	Argon	77	37,9	CO_2	78	38,3	Luft	79	37,8
5A	Argon	82	38,2	CO_2	80	38,0	Luft	81	37,5
6A	Argon	85	37,8	CO_2	83	38,5	Luft	84	37,6
7A	Argon	88	38,0	CO_2	86	38,0	Luft	87	37,9
8A	Argon	91	37,7	CO_2	90	38,2	Luft	89	37,3
9A	Argon	94	37,4	CO_2	93	37,9	Luft	92	37,7
arithm. Mittel			**37,97**			**38,29**			**37,72**
	$\Delta T_{CO2} - \Delta T_{Argon}$		**0,32°C**	**$\Delta T_{CO2} - \Delta T_{Luft}$**		**0,57°C**	**$\Delta T_{Argon} - \Delta T_{Luft}$**		**0,25°C**

Tabelle 5: Messungen mit Gasfüllungen bei Thermometer-Position **T1**

Vergleichstabelle Gasfüllung B:			RT-Thermometer unten+0cm links+0cm	T2					
Nr.	**Gas**	**Ref.- Nr.**	**ΔT [°C]**	**Gas**	**Ref.- Nr.**	**ΔT [°C]**	**Gas**	**Ref.- Nr.**	**ΔT [°C]**
1B	Argon	97	38,0	CO_2	96	38,8	Luft	95	38,0
2B	Argon	101	38,0	CO_2	99	38,1	Luft	98	37,6
3B	Argon	103	38,0	CO_2	102	38,1	Luft	100	37,7
4B	Argon	106	38,2	CO_2	107	38,2	Luft	104	36,8
5B	Argon	108	38,0	CO_2	110	38,6	Luft	105	37,7
6B	Argon	113	38,5	CO_2	112	38,1	Luft	109	37,8
7B	Argon	115	38,6	CO_2	114	38,3	Luft	111	37,7
8B	Argon	117	38,5	CO_2	118	38,0	Luft	116	38,0
9B	Argon	120	37,9	CO_2	121	38,6	Luft	119	37,7
10B	Argon	124	38,2	CO_2	123	38,2	Luft	122	37,5
arithm. Mittel			**38,19**			**38,30**			**37,65**
	$\Delta T_{CO2} - \Delta T_{Argon}$		**0,11°C**	**$\Delta T_{CO2} - \Delta T_{Luft}$**		**0,65°C**	**$\Delta T_{Argon} - \Delta T_{Luft}$**		**0,54°C**

Tabelle 6: Messungen mit Gasfüllungen bei Thermometer-Position **T2**

Zusammenfassung

Dieser Bericht verzichtet bewußt auf Fehlergrenzen oder statistische Auswertungen, bis auf die Mittelwertbildungen in den letzten beiden Tabellen. Dafür enthält er alle erwähnenswerten Mißlichkeiten, die im Laufe der zahlreichen Messungen auftraten und die in glattgeschliffenen, wissenschaftlichen Arbeiten normalerweise fehlen.

A: Variable Treibhaus-Fenster

1 Die Wood'schen Versuche zum Treibhauseffekt konnten im Küchenlabor prinzipiell bestätigt werden. Allerdings eignet sich die Anordnung mit Halogenlampe wegen des hohen IR-Anteils nicht sehr gut, um den Einfluß der **Strahlungskühlung** herauszupräparieren. Denn die eingestrahlte Energie durch ein optisch nahezu perfektes **NaCl**-Fenster wird stets merkbar größer sein als durch ein **Normalglas**-Fenster, egal wie gut ein IR-Filter davor auch sein mag. Dadurch wird die Ausstrahlung aus dem Treibhaus-Fenster überkompensiert und das **NaCl**-Fenster gewinnt das Temperatur-Rennen.
Wie die Ventilatorversuche in **Tabelle 1** zeigen, hat schon eine mäßige, äußere Luftbewegung den **5**- bis **6**-fachen Kühlungseffekt auf die Innentemperatur des Labortreibhauses wie die Differenz zwischen **Normalglas**- und **NaCl**-Fenster. Um auch noch die Störungen der Ausstrahlung und der äußeren Konvektion durch das Filterglas zu verhindern, müßten starke, gerichtete Lichtquellen ohne langwellige Anteile aus größerer Distanz eingesetzt werden.

2 Änderungen der inneren Wärmekapazität des Labortreibhauses haben keinen messbaren Einfluß auf die Maximaltemperatur(**Tabelle 1 / Nr. 7h, 8h**).

3 Durch eine innere **Widerstandsheizung** im Labortreibhaus lassen sich die Wärmephänomene differenzierter analysieren. Die **Strahlungskühlung** scheint hier deutlicher zu werden. Monokausalisten dürften bei der Deutung der Ergebnisse in **Tabelle 2** allerdings Probleme bekommen, denn die **Wärmeeinkopplung** zwischen Gas und Fenster(ersatz) ist auch hier immer mit im Spiel.
3.1 Zwischen **Glas**- und **NaCL**-Fenster sind bei gleicher Heizleistung **2,5 - 3°C** Differenz zugunsten des Glasfensters festzustellen(**Tabelle 2 / Nr.1 - 4**).
3.2 Beidseitig geschwärzte Alufolie als Fensterersatz ergibt eine leichte Temperaturerhöhung von **0,5 - 1°C** gegenüber Glas. Beidseitig blanke und einseitig innen blanke Alufolien erhöhen die Innentemperatur dagegen um **3 – 3,5°C** gegenüber Glas, während die einseitig außen blanke Folie mit ΔT_{Glas} **= 2 - 2,5°C** eine Mittelstellung einnimmt(**Tabelle 2 / Nr.5 - 9**). Hier scheint die **Strahlungskühlung** eine messbare Rolle zu spielen. Bei den Temperaturdifferenzen gegenüber echten Fenstern ist allerdings auch die geringe Schichtdicke zu berücksichtigen, die die Fenster-Geometrie verändert.

4 Die Fenster-Geometrie wird in der Serie **Tabelle 2 / Nr.10 - 16** erhalten. Hier wird die Wärmestrahlung in Richtung Fenster durch die Auskleidung der Strahlungsdose mit blanker Alufolie stark verringert(s.o. **Kirchhoff'sche Regel**).
4.1 Vergleiche der zeitnahen Messwerte beim **Glas**-Fenster **plus / minus Alufolie** ergeben kaum messbare **0,1°C** Unterschied, kein Wunder, denn das Glas hätte sowieso kaum direkte Wärmestrahlung durchgelassen.
4.2 Die Differenz der Temperaturmaxima beim **NaCl**-Fenster **plus / minus Alufolie** beträgt dagegen **1,8°C**. Hier tritt die **Strahlungskühlung** deutlich hervor.
4.3 Ein **offenes** Fenster **plus / minus Alufolie** führt zu **0,2°C** Differenz. Deckt man die Öffnung mit einem **Fliegengitter** ab, das die Strahlung kaum behindert, wohl aber die **Konvektion**, steigt die Temperatur im Inneren um **10,5 - 10,9°C**, ein Beleg für die Dominanz der **Konvektion** bei der Treibhauskühlung(**Tabelle 2 / Nr.16 - 20**).

B: Variable Gasfüllungen mit NaCl-Fenster - Luft, Argon, CO_2

1 **Serie I** – ohne Berücksichtigung der Raumtemperatur(**Tabelle 3, Abb. 13**)
Während der Messungen in dieser Serie wurden einige erkannte und potentielle Fehler beseitigt. Daher ist dieser Meßwerte-Satz in sich nicht konsistent und zeigt lediglich Tendenzen.

1.1 Zwischen **Luft** und **CO_2** ergibt sich bei zeitnahem Vergleich der Messwerte eine durchschnittliche Temperaturdifferenz von ca. **1°C** zugunsten der **CO_2**-Füllung, allerdings bei stark schwankenden Messwerten(**Abb. 13**).
1.2 Die Argon-Werte liegen bei zeitnahem Vergleich zwischen denen der anderen Gase(**Abb. 13**).

2 **Serie II** – mit Raumtemperatur-Vergleichsmessungen(**Tabellen 4, 5 und 6; Abb. 15**)

2.1 Bei Thermometer-Position **T1** (**Nr. 68 – 94**) entstehen zwischen **Argon/Luft, Argon/CO_2** und **Luft/CO_2** mittlere Temperatur-Differenzen von **0,25°, 0,32°** und **0,57°C**. Die Werte sind aus den Raumtemperatur-Differenzen gemittelt(**Tabelle 5**).
2.2 Bei Thermometer-Position **T2** (**Nr. 95 – 124**), die als relevanter eingeschätzt wird, entstehen analoge Temperaturdifferenzen von **0,54°, 0,11°** und **0,65°C** (**Tabelle 6**). Diese Werte korrelieren so gut mit den **Wärmeleitfähigkeiten** der Gase und sind so niedrig, daß kaum noch Raum für zusätzliche, wärmewirksame *Rückstrahlungsphänomene* bleibt. - Aber die sollen ja auch ganz weit oben stattfinden, wo man sie genausowenig findet wie die zugehörigen Temperaturanstiege der oberen Atmosphäre. -

Literatur und Bezugsquellen:

[1] Gerhard Gerlich und Ralf D. Tscheuschner* *„Falsification Of The Atmospheric CO2 Greenhouse Effects Within The Frame Of Physics“* Version 3.0 (September 9, 2007)

[2] R. W. Wood, *“Note on the Theory of the Greenhouse”,* Philosophical magazine **17**, 319-320 (1909)

[3] Korth Kristalle GmbH, D-24161 Altenholz(Kiel), Am Jägersberg 3

[4] H. Hug und J. Barrett, „Hug & Barrett versus IPCC“, http://www.john-daly.com/forcing/hug-barrett.htm

* Prof. Gerhard Gerlich, Institut für mathematische Physik, Technische Universität Braunschweig, Dr. Ralf D. Tscheuschner, Hamburg

Fazit: *Eine interessante Beschäftigung für einen Chemiker in Rente!*
Version 1.5 *Wilhelmshaven, den 17.8.2008; Ehrenfried Loock*